

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE FILOSOFÍA
Departamento de Lógica y Filosofía Teórica



TESIS DOCTORAL

**EL DARWINISMO CUÁNTICO:
EL CONCEPTO DE INFORMACIÓN Y LA METAFÍSICA DARWINISTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Juan Campos Quemada

Bajo la dirección del doctor

Mauricio Suárez Aller

Madrid, 2019



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS
PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

D. Dña. JUAN CAMPOS DUGUADA,
estudiante en el Programa de Doctorado DE FILOSOFÍA,
de la Facultad de FILOSOFÍA de la Universidad Complutense de
Madrid, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y
titulada:

EL DARWINISMO CONTEMPORÁNEO: EL CONCEPTO DE
INFORMACIÓN Y LA LEGÍTIMA DARWINISTA
y dirigida por: Dr. MAURICIO SUÁREZ ALCAZ

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Madrid, a 30 de OCTUBRE de 2019

Fdo.: 

Esta DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD debe ser insertada en
la primera página de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor.

EL DARWINISMO CUÁNTICO: EL CONCEPTO DE INFORMACIÓN Y LA METAFÍSICA DARWINISTA

Resumen

La evolución mediante selección natural tiene como objetivo principal explicar el cambio y la adaptación al entorno de los organismos. Desde que Darwin publicara el *El origen de las especies*, este proceso ha adquirido un alto grado de abstracción gracias a la formulación matemática derivada de su incorporación a la genética de poblaciones.

Esta formalización de la teoría no ha sido inocua. Ha venido acompañada de implicaciones metodológicas, epistemológicas y ontológicas importantes. En efecto, al desplazar el foco de atención desde el individuo a la población, la explicación descriptiva de la estructura causal propuesta por Darwin ha sido reemplazada por una explicación en términos estadísticos. Esto ha significado la separación entre la agencia y la contabilidad. Ésta es la clave para entender el denominado “darwinismo del gen”. Este subparadigma darwinista defiende una estrategia reductora que diferencia entre el replicador - el gen “inmortal”, que sería la causa relevante de la evolución- y el vehículo o interactor - el organismo-.

El nuevo enfoque estadístico también ha favorecido la elaboración de modelos computacionales que, junto a la nueva orientación del replicador, han promocionado el uso analógico del darwinismo en diversas disciplinas científicas y sociales.

En el campo de la física, esta influencia se evidencia en el programa de investigación dedicado a los fundamentos de la teoría cuántica. El Darwinismo Cuántico y la interpretación existencial se apoyan en una analogía darwinista para dar cuenta de la emergencia del mundo clásico desde un sustrato cuántico.

Esta disertación analiza la analogía del Darwinismo Cuántico y su papel en la interpretación existencial de la teoría cuántica. Para la consecución de este fin, se requiere: determinar la concepción de lo que se entenderá por proceso darwinista (parte I), exponer el problema de la medida (parte II) y su posible solución mediante el Darwinismo Cuántico (parte III) sobre el que se desea emplear la analogía para aumentar la plausibilidad de la explicación. Finalmente, se analiza la bondad del razonamiento analógico y sus consecuencias para la interpretación existencial (parte IV).

La tesis defendida en este trabajo es que el Darwinismo Cuántico es una metáfora (*catacresis*) que sirve para estructurar un nuevo campo de investigación: la transición entre el mundo cuántico y la experiencia cotidiana de la naturaleza. Se mostrará que no es plausible una analogía con la evolución por selección natural de Darwin aunque se podría admitir que

II

el proceso de Darwinismo Cuántico es análogo al principio de selección natural negativo.

Por otro lado, el argumento analógico del Darwinismo Cuántico despliega un papel heurístico y retórico dentro de una orientación pragmatista de la interpretación de la mecánica cuántica. No obstante, un indebido ascenso semántico desde el nivel material al formal, basado en el concepto polisémico de información, arruina la posibilidad de aumentar el poder explicativo o la comprensión de los sistemas cuánticos desde un enfoque realista.

Ésta es la razón fundamental por la que la interpretación existencial no logra fortalecer el objetivo de conectar el formalismo de la teoría cuántica con la experiencia física ordinaria y cae en un monismo metafísico de corte inmaterialista, el denominado darwinismo universal de procesos, para el que todo cambio en la naturaleza se puede reducir a un algoritmo de tipo darwinista que procesa información.

No obstante, demostramos que el Darwinismo Cuántico y la interpretación existencial fracasan como sustento de dicha metafísica darwinista.

Palabras clave: darwinismo, selección natural, teoría cuántica, interpretación existencial, Darwinismo Cuántico, información, Shannon, von Nuemann, Fisher, estado cuántico, problema de la medida, transición cuántico-clásico.

QUANTUM DARWINISM: THE CONCEPT OF INFORMATION AND THE DARWINIAN METAPHYSICS

Abstract

The main goal of evolution through natural selection is to explain the changes in organisms and their adaptation to the environment. Since the publishing of Darwin's *The Origin of Species*, evolution has acquired a high level of abstraction derived from the mathematical formulation which comes from its integration in population genetics.

This formalization of the theory has not been without consequence. It has brought many important methodological, epistemological and ontological implications. By focusing not on the individual but on the population, the descriptive explanation of the causal structure proposed by Darwin has been replaced by a description in statistical terms therefore causing the separation between the agency and the accounting. This has been key to understanding the so called "Gen eye view". The Darwinist subparadigm defends a reductionist strategy which differentiates between the replicator - the immortal gene - the relevant cause of evolution - and the vehicle or the interactor, meaning the organism.

The new statistical approach has also favoured the development of computational models which, together with the new orientation of the replicator, have promoted the analogical use of Darwinism in different scientific and social sciences.

In physics, there is a clear evidence of this influence in the research programme devoted to the fundamentals of quantum theory. Quantum Darwinism and the existential interpretation are both based on a darwinian analogy in order to explain the emergency of the classical world from a quantum realm.

This dissertation analyzes the analogy of Quantum Darwinism and its role in the existential interpretation of the quantum theory. This analysis requires: to determine the idea of what we call darwinian process (first section), to present the measurement problem (second section) and a possible solution to this problem using quantum darwinism (third section). In this third section, analogy is used to make the explanation more plausible. Finally, in section four, we find the analysis of the advantages of analogical reasoning and the consequences for the existential interpretation.

The argument defended in this thesis is that Quantum Darwinism is a metaphor used to give shape to a new line of research: the transition between the quantum world and the everyday experience of nature. It shows that an analogy with Darwin's evolution through natural selection is not plausible even if it can be admitted that the quantum darwinism process is analogous to the negative natural selection principal.

On the other hand, the analogical argument of quantum darwinism shows a heuristic and rethorical role within the pragmatic orientation of the interpretation of quantum mechanics. However, a wrongful semantic ascent from a material level to a formal one, based on the polysemic concept of information, destroys the possibility of increasing the explanatory force or the comprehension of quantum systems from a realistic point of view.

This is the main reason why the existential interpretation is not able to reinforce the objective of connecting the formalism of the quantum theory with day to day physical experiences and thus transforms into a metaphysical monism, called universal darwinism processes, which advocates that all changes in nature can be reduced to a darwinian algorithym used to process information.

However, we demonstrate that Quantum Darwinism and existential interpretation fail to sustain this Darwinian metaphysics.

Keywords: Darwinism, natural selection, quantum theory, interpretation, existential interpretation, Quantum Darwinism, information, Shannon, von Nuemann, Fisher, quantum state, measurement problema, quantum to classical transition.

Índice general

Resumen	I
Abstract	III
Lista de figuras	IX
Agradecimientos	XIII
Introducción	XVII
Objetivos de la Investigación	XIX
Metodología	XIX
 I LA FUENTE: EL DARWINISMO	 XVII
Introducción	1
1. La Hipótesis de Darwin	7
1.1. La invención del tiempo profundo	7
1.1.1. Adaptación y extinción	10
1.1.2. La primera solución transformista	14
1.2. El Darwinismo de Darwin	15
1.2.1. La formación	15
1.2.2. Tiempo y secularización	18
1.2.3. Del Ensayo al Origen	23
1.2.4. El soporte empírico	24
1.2.5. El origen de las especies	25
1.3. Metodología, epistemología y ontología	26
1.3.1. La vera causa	26
1.3.2. La estructura del argumento de Darwin	31
1.3.3. La Reconstrucción del Argumento de Darwin	33
1.4. La Explicación Darwinista de Darwin	36

2. El camino hacia la abstracción	43
2.1. Introducción	43
2.2. Genética mendeliana y bioestadística	44
2.3. Consecuencias epistemológicas y metodológicas	47
2.4. La Selección Natural en abstracto	49
2.4.1. La ecuación de Price	51
2.4.2. El darwinismo como transferencia de información	55
Conclusiones	63
 II EL PROBLEMA: LA TRANSICIÓN DEL MUNDO CUÁNTICO AL CLÁSICO	 67
Introducción	69
3. La interpretación de la teoría cuántica	71
3.1. ¿Qué es una teoría?	71
3.2. El experimento de Stern-Gerlach	73
3.3. La estructura de la nueva física	75
3.4. El problema de la medida	81
3.4.1. Solución al pequeño problema de la medida	82
4. Decoherencia	87
4.1. Introducción	87
4.2. El formalismo de decoherencia	90
4.3. Los criterios de selección de la base privilegiada.	94
4.3.1. La conmutación con el hamiltoniano de interacción	95
4.3.2. El tamiz de predictibilidad	97
4.4. Decoherencia, visualización e inteligibilidad	98
4.4.1. La ecuación maestra	98
Conclusiones	103
 III EL OBJETIVO: EL DARWINISMO CUÁNTICO	 105
Introducción	107
5. El Darwinismo Cuántico	109
5.1. Repetibilidad, saltos cuánticos y el concepto de copia	109
5.2. La regla de Born desde las simetrías de entrelazamiento	113
5.3. Dificultades del programa de decoherencia	116
5.4. La información mutua cuántica	120
5.5. La redundancia	125

5.6. Transferencia de información y Darwinismo Cuántico	128
6. La interpretación existencial	133
6.1. Entre las interpretaciones de Niels Bohr y Hugh Everett	136
6.1.1. La interpretación del estado relativo	137
6.1.2. La interpretación de Bohr interpretada	141
6.2. La naturaleza de los estados cuánticos	149
6.2.1. Interpretación existencial y modelos ontológicos	158
Conclusiones	161
 IV EVALUACIÓN DE LA ANALOGÍA	 165
Introducción	167
 7. El razonamiento analógico	 171
7.1. La perspectiva lógica	171
7.2. Estructura del argumento analógico	173
7.3. Evaluación de la plausibilidad de las analogías	175
7.4. El modelo articulado de Paul Bartha	176
7.4.1. Analogías explicativas abductivas de tipo probabilístico	180
 8. La analogía del Darwinismo Cuántico	 181
8.1. Objetivos de la analogía	181
8.2. Nuestro enfoque metodológico	182
8.3. El Darwinismo cuántico como metáfora	184
8.4. Analogía formal	186
8.4.1. Análisis conceptual	190
8.5. Evaluación de la analogía formal	201
8.6. Una analogía matemática	203
8.6.1. Analogía informacional	205
 Conclusiones	 215
 V CONCLUSIONES GENERALES	 217
 Una larga argumentación	 219
 APÉNDICE	 227
 A. El Formalismo de la Mecánica Cuántica.	 227

A.1. Estados puros	228
A.1.1. Postulado 1.- Completud de $ \Psi\rangle_R$	228
A.1.2. Postulado 2.- Evolución de estados de sistemas aislados.	231
A.1.3. Postulado 3.- Contenido empírico y regla de Born.	233
A.1.4. Postulado 4.- Evolución del sistema bajo la medida.	236
A.1.5. Postulado 5.- Composición de sistemas cuánticos.	238
A.2. Estados mezcla	243
A.2.1. El formalismo de las matrices de densidad.	243
A.2.2. Matriz densidad reducida	248
A.3. La Interpretación Mínima.	250
 B. El concepto de información de Shannon	 253
 Bibliografía	 263

Índice de figuras

1.1. Síntesis del argumento de Darwin en dos procesos distintos. En la parte superior el principio de selección natural (PSN) de naturaleza sincrónica. En la parte inferior, el proceso diacrónico iterativo que junto al primero constituyen la teoría de la selección natural (TSN).	36
3.1. Diagrama del experimento de Stern-Gerlach [1922]. La variación del campo magnético B fuertemente inhomogeneo $\frac{\partial B}{\partial z}$ en la dirección del eje z perturba la trayectoria de los átomos. En contra de la previsión clásica, aparecen dos zonas de impacto netamente separadas. Adaptada de la placa conmemorativa de la Universidad de Frankfurt.	74
3.2. Preparación de espín electrónico en la dirección del eje Z	76
3.3. Preparación de espín electrónico en la dirección del eje Z	76
3.4. Operación de grano grueso (OGG). En la parte superior, la trayectoria continua de la figura de la izquierda contiene toda la información. Tras la (OGG), se obtiene una figura pixelada como resultado de la pérdida de información. En la parte inferior, la (OGG) de un vector se obtiene mediante la operación de proyección sobre uno de la base de representación. Por tanto, se pierde la información de la componente complementaria de la base.	84
4.1. Representación del estado y su trayectoria en el espacio de las fases posición q , momento líneal p . Un punto en el caso clásico (p, q) , un punto difuminado en el caso cuántico $ p, q\rangle$	99
4.2. Representación del estado y su trayectoria en el espacio de las fases.	99
4.3. Estado de superposición de las posiciones para una partícula. Tomado de [Zurek, 2002].	100
4.4. Evolución de la distribución de Wigner en el tiempo de decoherencia. Imagen adaptada de Zurek [2002].	101

5.1. Los distintos modelos requieren de conceptos de entorno distintos desde los más simples hasta los más estructurados: a) Decoherencia: el universo se divide entre sistema y entorno, b) Redundancia: el entorno se divide en subentornos, c) Los subentornos se combinan formando fragmentos y cada uno tiene casi la información completa del sistema, a la que pueden acceder los distintos observadores (Darwinismo Cuántico). Tomado de [Zurek, 2009].	120
5.2. La información sobre el sistema contenida en una fracción del entorno muestra una curva en rojo que representa la información establecida mediante decoherencia. Con unos pocos fragmentos medidos, la información clásica se satura en la meseta, los fragmentos extra no aportan más información. La información completa -con las correlaciones cuánticas- se consigue midiendo casi todo el entorno. La línea verde representa la información que aporta la medida de un estado aleatorio puro en el sistema compuesto SE. Adaptado de [Zurek, 2007, p.17]	127
5.3. La observación del primer fragmento nos facilita toda la información clásica, representada por la meseta en rojo. La información completa, que incluye la coherencia cuántica, del sistema entrelazado se obtiene inspeccionando el segundo fragmento. Adaptado de [Zurek, 2007, p.17]	128
5.4. La observación del primer fragmento nos facilita toda la información clásica. La observación del segundo fragmento no aporta nada nuevo. Con la obtención del entorno completo accedemos a toda la información, incluidas las correlaciones cuánticas. Adaptado de [Zurek, 2007, p.17]	130
5.5. La observación de un número suficiente de fotones aporta la información clásica deseada con un margen de tolerancia. Adaptado de [Zurek, 2008, p.20].	131
6.1. Experimentos de la doble rendija.	143
8.1. Esquema formal de aplicación del modelo de Darwinismo Cuántico a la transición cuántico-clásico. Ver resumen de la tercera parte en la página 161.	191
8.2. Argumento del Darwinismo Cuántico.	196
8.3. Análisis bidimensional de la analogía entre la Selección Natural de Darwin y el Darwinismo Cuántico.	200
8.4. Esquema de una situación de comunicación. El círculo azul representa el canal. . . .	209
A.1. El cubit como estado cuántico bicomponente representado en un <i>bra</i> . Imagen tomada de [Dür y Heusler, 2013]	229
A.2. Descomposición de cubits en la base estándar $\{ 0\rangle, 1\rangle\}$. Imagen tomada de [Dür y Heusler, 2013]	230
A.3. Medida de un cubit en superposición. Imagen tomada de [Dür y Heusler, 2013] . . .	237
A.4. Intercambio por entrelazamiento.	242

- A.5. Matrices densidad representadas en una esfera de Bloch. Los puntos interiores de la esfera corresponden a los estados mezcla, salvo el centro. Los puntos sobre la superficie representan a los estados puros. Fuente, internet y elaboración propia. . . 246

Agradecimientos

Hoy concluye una etapa importante de un proyecto intelectual que comenzó probablemente en la infancia con las primeras preguntas por el sentido de las cosas. Ciertamente cuanto más fascinantes son los enigmas mayor deleite se encuentra en la comprensión.

Las dos preguntas fundamentales que desde entonces resumen mi búsqueda son sobre la naturaleza del Universo y nuestro lugar en él. Pronto me di cuenta de que la respuesta llevaría su trabajo. Me pareció conveniente compartir mis dudas e intentar aprender de aquellas personas que se han formulado seriamente alguna vez las mismas cuestiones.

Por esta razón, tengo el deber moral y la satisfacción de mostrar mi agradecimiento a todas aquellas personas sin las cuales esta disertación no hubiera sido posible.

En primer lugar, deseo agradecer a mi director, Mauricio Suárez Aller, su generosa dedicación, sabia pedagogía y paciencia ante mi ignorancia. Hubiera sido imposible finalizar este trabajo sin su ayuda. He aprendido de él la importancia que tiene el formular adecuadamente las preguntas filosóficas, en especial cuando alguien se quiere dedicar al estudio de los fundamentos de la mecánica cuántica. Me gustaría también destacar el valor de su trabajo incansable por crear y mantener un grupo de investigación que forma una verdadera familia intelectual en la que poder crecer como investigador.

Me siento en deuda con cada uno de sus miembros. Cristina Villegas ha seguido paso a paso la ejecución de este trabajo durante los últimos tres años y lo hemos pensado en alta voz una y otra vez. Laura Nuño ha leído pacientemente los capítulos dedicados a la biología y sus sugerencias e información bibliográfica han sido fundamentales para afrontar con confianza una disciplina que me era ajena. Finalmente, sus argumentos me ha convencido de que el futuro del darwinismo pasa por incorporar la teoría del desarrollo a una nueva síntesis. Pedro Juan Sánchez es una fuente inagotable de sabiduría. Sus sugerencias en los primeros pasos de la composición de esta disertación y su entusiasmo por el proyecto ha sido un acicate para el estudio. Con Carlos Corona comparto completamente su amor por la comprensión de la física y las matemáticas. He aprendido de él lo importante que son los detalles formales como punto de arranque de cualquier investigación.

Sin duda, como defendía Vigotsky, no sólo se aprende de los maestros. Tal vez es más importante el aprendizaje social entre iguales. Debo agradecer a Cristina Fernández y Javier Yañez los conocimientos compartidos en el grupo de lectura de filosofía de la ciencia. Gracias

a su ayuda, tuve la ocasión de profundizar en algunos de los tópicos más importantes de filosofía de la ciencia y de la física. Comenzamos un proyecto de filosofía de la naturaleza que sin duda retomaremos.

Las primeras lecturas sobre la familia de interpretaciones del estado relativo fueron consecuencia del interés de Iñaki San Pedro por desvelar los misterios del libro *Many Worlds?* Sus explicaciones y preguntas estructuraron mi proyecto de investigación. Gracias a que Albert Solé me invitó a dos magníficos congresos sobre la función de onda, aprendí que el problema central de la teoría cuántica pasa por desvelar su naturaleza. Además, pude conocer y compartir hotel con Arthur Fine. Es imposible imaginar lo que se puede aprender de este filósofo en tres desayunos, varios viajes de metro y un paseo por el Puerto Olímpico de Barcelona.

Esta necesidad por escudriñar los fundamentos de la física me llevó a cuatro intensos cursos de verano organizados por la Ludwig Maximilian Universität München y la Université de Lausanne. Debo a esta escuela gran parte de mi conocimiento sobre filosofía de la física y de la naturaleza.

En las charlas y seminarios impartidos por Michael Esfeld he aprendido cuáles son los distintos tipos de relación entre la física y la metafísica. Confirmó con nuevos argumentos que el camino para una buena interpretación pasa por una filosofía de la naturaleza en la que ambas disciplinas son inseparables. Jeffrey Barrett me aclaró muchos de los interrogantes en relación a la interpretación de Múltiples Universos y compartí con él mi interés por el destacado papel pedagógico de John Archival Wheeler. Otro hito importante en el desarrollo de esta tesis fueron las dos largas conversaciones que mantuve con Tim Maudlin sobre el estatuto ontológico de la función de onda y del mensaje que se sigue de la obra de John Bell. A los bohmianos Detlef Dürr, Nino Zanghi y Selly Goldstein, les agradezco su paciente escucha sobre una interpretación que está en las antípodas de lo que ellos entienden por una buena manera de comprender la teoría cuántica. Las preguntas y el interés de Selly por este proyecto en un momento delicado de su desarrollo aportaron la confianza renovada necesaria para su consecución.

En cuanto a los años de formación y estudio en la Universidad Complutense, tengo que reconocer mi deuda con el grupo de Información y Computación Cuántica de la Facultad de Físicas. Especialmente, agradezco a Miguel Ángel Martín-Delgado el haberme permitido asistir al curso de Máster sobre esta disciplina. También deseo recordar a los profesores de la asignatura Juan José García Ripoll y a Alberto Galindo Tixaire por contestar cada una de mis preguntas y por los interesantes debates filosóficos. Así mismo, quiero agradecer a otro físico teórico, mi amigo Gregorio Orozco, la lectura detallada que ha realizado de este trabajo. Gracias a él conocí a Andrés Cassiniello cuya tesis doctoral y sus publicaciones han servido para aclarar muchas dudas sobre las relaciones entre la interpretación de los múltiples universos y la teoría de la información.

En este mismo contexto, me gustaría recordar a Andres Rivadulla, con quien tuve la suerte de compartir dos cursos de Física. Fue mi primer conocimiento del interés que para

la ciencia tiene el conocimiento filosófico. Nos reencontramos en la Facultad de Filosofía donde tuvo la amabilidad de aceptarme en sus clases de filosofía de la física y de filosofía de la ciencia.

Aunque parezca una antinomia, tal vez impropia de una tesis de filosofía, deseo terminar por el principio. Las primeras preguntas sobre la naturaleza me llevaron a emprender una carrera científica. Pero mi paso por la Facultad de C.C. Físicas no me dejó satisfecho. Allí no estaban todas las respuestas. Siendo más concreto, en general no se dedicaba suficiente tiempo a comprender el significado e interpretación de las teorías. Menos aún a lo que implicaban sobre la naturaleza del mundo.

En una reunión de antiguos alumnos del colegio, compartí esta inquietud con mi amigo José Luís Ramírez, que por entonces era catedrático de retórica en la Facultad de Filosofía de la Universidad de Uppsala. Me recomendó leer el libro de R.G. Collingwood *Idea de la Naturaleza*. Ésta fue la primera revelación de que la ciencia, a pesar de todos sus éxitos, no tenía la última palabra sobre los secretos del universo. En ese libro, el autor afirmaba que “[...] un científico que no ha filosofado jamás sobre su ciencia no pasará de ser un científico de segunda mano, imitador y jornalero. Alguien que no ha pasado jamás por cierto tipo de experiencia no puede reflexionar sobre ella; un filósofo que no ha estudiado ni trabajado jamás la ciencia natural no puede filosofar sobre ella si no es engañándose a sí mismo”.

Aquella lectura me mostró con nitidez el camino. Una vez matriculado en filosofía me dí cuenta de que muchos de los grandes científicos eran también los grandes filósofos de la naturaleza. Estudié su obra en las distintas asignaturas del Máster de Estudios Avanzados de Filosofía: las clases de filosofía de la relatividad de Mauricio Suárez se complementaban de manera ideal con la asignatura de ontología y epistemología de la relatividad, que impartía Juan Antonio Valor.

El magisterio de Ana Rioja me introdujo en el profundo debate filosófico de los creadores de la física cuántica en su curso de Ciencia y Realismo. Fruto de aquellas clases y animado por la profesora, emprendí la tarea de divulgar la ciencia entre los alumnos de filosofía. Para ello tuve que estudiar y preparar en profundidad, la física de la primera parte del siglo XX y la astronomía antigua y la moderna. Ésta ha sido una de las mayores fuentes de felicidad de los últimos años y verdadero impulso en la consecución de esta tesis.

Finalmente, Carlos Castrodeza me desveló la fascinante cosmovisión darwinista en la que vivimos y José Luís González Recio me enseñó la necesidad de investigar la relación estrecha entre metodología, epistemología y ontología para comprender las teorías sin olvidar el marco histórico en el que se desarrollan.

Desgraciadamente, el inspirador de este proyecto, mi querido tutor y primer director, José Luís González Recio, no podrá compartir conmigo la satisfacción del trabajo que juntos comenzamos. Gracias querido maestro.

Esta tesis se la dedico a mi hada madrina, mi hermana, a quien me dio la vida, mi madre, y a quienes le dan sentido, Mariana y Miranda.

"Und so hat sogar Physik die so vorteilhafte Revolution ihrer Denkart lediglich dem Einfalle zu verdanken, demjenigen, was die Vernunft selbst in die Natur hineinlegt gemäß, dasjenige in ihr zu suchen (nicht ihr anzudichten), was sie von dieser lernen muß, und wovon sie für sich selbst nichts wissen würde." [Kant, I. *Kritik der reinen Vernunft*, 1787, BXIV]

[Y así, incluso la física tiene que agradecer la tan provechosa revolución de su manera de pensar únicamente a la ocurrencia de buscar en la naturaleza (no atribuirle de manera infundada), de acuerdo con lo que la razón misma introduce en ella, aquello que debe aprender de ella, de lo cual ella [la razón], por sí misma no sabría nada.]

"Its subject is a contemporary version of what used to be called Natural Philosophy. In my view, we are in a better frame of mind today to conceive a natural philosophy than at any time in the last three hundred years. This is because the recent findings in human biology have given a new direction to scientific thought, a shift from the general to the individual, for the first time since the Renaissance opened the door into the natural world." [Bronowski, 1973, p.15]

[El tema de esta obra es una versión contemporánea de lo que se solía llamar filosofía de la naturaleza. A mi modo de ver, estamos en la actualidad mejor preparados intelectualmente para concebir la filosofía natural que en los últimos trescientos años. Y eso se debe a que los recientes descubrimientos en biología humana han dado una nueva dirección al pensamiento científico, lo han desplazado de lo general a lo individual, por primera vez desde que el Renacimiento abrió las puertas del mundo natural.]

Introducción

El proyecto de investigación que dio origen a esta disertación pertenece a la filosofía de la naturaleza entendida como la disciplina filosófica dedicada al estudio de los fundamentos lógicos, metodológicos, epistemológicos y ontológicos de las ciencias [cf., González, 2000].

El presente trabajo representa el primer estadio en la consecución del citado proyecto. Su ámbito de investigación se circunscribe al problema de la interpretación de la teoría cuántica y su relación con las teorías de la información y de la evolución por selección natural.

Como es bien conocido, tras casi cien años desde su formulación matemática e independientemente de su exitosa aplicación práctica, sigue abierta la controversia sobre cómo conectar el formalismo cuántico con la experiencia cotidiana. Una de las principales cuestiones que una interpretación debe resolver es el denominado problema de la medida, ejemplificado magistralmente por la famosa paradoja del gato de Schrödinger [1935].

El Darwinismo Cuántico junto a la denominada interpretación existencial representan una de las posibles soluciones a este enigma. Éste es el tema de investigación del presente estudio.

Las nociones principales que deben clarificarse para comprender este programa de investigación son cuatro: el darwinismo como proceso, los conceptos de información y estado cuántico y la analogía como estrategia epistémica¹.

Las dos primeras ideas han desbordado el marco científico del que surgieron, convirtiéndose en términos transversales a todas las ciencias. De ahí que surjan problemas derivados de su uso en el ámbito interdisciplinar.

La tercera forma parte de uno de los problemas más acuciantes de la filosofía de la física. Si la función de onda es el único concepto teórico en la mecánica cuántica ortodoxa necesario para conocer el estado físico de un sistema y su representación se despliega en un espacio de configuración multidimensional, ¿cuál es su relación con las entidades de la experiencia física tridimensional ordinaria?

Por último, a pesar de que el empleo de metáforas, modelos y argumentos analógicos ha sido objeto de estudio desde los orígenes del pensamiento científico y filosófico, ¿aportan algún valor epistémico a la explicación y comprensión científica o sólo forman parte de los contextos de descubrimiento? Parece que es más factible responder a esta pregunta si la

¹Agradezco especialmente a Maricio Suárez la sugerencia de consultar la literatura sobre analogía y, en concreto, la obra de Paul Bartha [2010].

circunscribimos a casos concretos que si se aborda mediante planteamientos generales de las teorías de la ciencia.

Suscitado por estas dudas, se ha desplegado el trabajo filosófico orientado a aclarar estas ideas y su interrelación en el caso específico del Darwinismo Cuántico.

No obstante, son múltiples los motivos que nos han impelido a realizar esta investigación. En primer lugar, el descubrimiento de ciertas lagunas en la crítica. En efecto, a pesar de que existen algunos análisis técnicos sobre el programa general de decoherencia llevado a cabo por Zurek y colaboradores², no ponen al descubierto las estrategias epistémicas seguidas por los autores, ni aclaran los posibles compromisos ontológicos que despliega la citada interpretación.

En segundo lugar y relacionado con la cuestión anterior, la explicación del proceso de transición entre el mundo cuántico y el clásico llevada a cabo por el Darwinismo Cuántico se apoya en una hipótesis análoga a la evolución por selección natural. Generalmente, a pesar del papel cada vez más relevante de los modelos en filosofía de la ciencia como mediadores entre la teoría y el mundo, el estudio de la plausibilidad de las analogías y su función no suele llevarse a cabo con la profundidad requerida en casos concretos. En especial, la comunidad científica no suele “tomarse a Darwin en serio”³ cuando evalúa el cometido que desempeña esta metáfora en la comprensión científica.

En tercer lugar, ciertamente es una novedad que una teoría física tome recursos epistemológicos de la biología. Sin duda, avala la capacidad retórica, heurística y explicativa que pueden desarrollar las teorías y los modelos de esta disciplina. Lo cierto es que la explicación darwinista del cambio y adaptación de los sistemas se presenta como modelo fácilmente exportable a cualquier ámbito del conocimiento, incluida la propia epistemología.

Por último, pensamos que no es habitual encontrar autores que se embarquen en un estudio interdisciplinar por la dificultad y el riesgo que entraña la tarea de relacionar las técnicas, los conceptos y los objetivos de varios campos de estudio. Creemos que este trabajo de síntesis no sólo precisa del conocimiento profundo de las citadas ciencias, también requiere desplegar los recursos propios de la filosofía para poder destrenzar la polifonía conceptual, explorar su estructura relacional y aclarar su función. Todo este trabajo se debe realizar en aras de comprender las preguntas formuladas en la frontera indefinida entre las distintas ciencias, para poder afrontar con confianza sus posibles respuestas.

En definitiva, pensamos que la tarea de analizar y clarificar los problemas que surgen en el ámbito interdisciplinar es propia de la filosofía porque su panóptica mirada se complementa con su inherente naturaleza crítica.

²El libro de texto escrito por Schlosshauer [2007] y la crítica de Janssen [2008].

³Título de la obra de Michael Ruse [1986].

Objetivos de la Investigación

De lo dicho anteriormente se sigue que la finalidad principal de esta disertación es analizar la analogía que propone el Darwinismo Cuántico con relación al proceso de evolución por selección natural y su papel en la interpretación existencial de la teoría cuántica.

Los argumentos expuestos en este trabajo se sustentan en una estructura compuesta por distintos objetivos orientados a satisfacer dicho propósito. La propia organización tetrapartita de la disertación refleja la arquitectura de los argumentos analógicos: fuente, objetivo, hipótesis análoga y evaluación.

En la primera parte se especifican las características de la fuente de la analogía. Para ello, es menester cumplir dos objetivos: el primero (cap.1) pretende aclarar los distintos tipos de darwinismo de Darwin según una versión particularmente relevante de la historiografía biológica. El segundo (cap.2) trata de describir de manera sintética el proceso de abstracción y matematización sufrido por el darwinismo hasta su consecución como proceso computacional.

En la segunda parte, se presenta de manera pormenorizada el problema para el que se propone la analogía. El objetivo que se desea alcanzar es exponer el problema de la medida de la teoría cuántica de tal manera que pueda ser fácilmente analizable en los términos de las distintas teorías de la ciencia, distinguiendo el formalismo de la interpretación (cap. 3). Además, debe presentar una estructura orientada a la resolución de dicho problema según lo plantea el programa de decoherencia (cap.4) y el del Darwinismo Cuántico.

La tercera parte se dedica a exponer la hipótesis análoga a evaluar: el Darwinismo Cuántico (cap.5). Es particularmente importante aclarar la naturaleza del proceso formal de transición cuántico-clásico supuestamente análogo a la selección natural. En este sentido, el análisis de la medida en términos de la teoría de la información es un objetivo prioritario. Por último, es preciso describir los problemas y las soluciones tentativas que aporta la interpretación existencial (cap.6). Concretamente, se debe dilucidar la naturaleza óptica o epistémica de los estados cuánticos, para saber si es plausible una analogía explicativa que desvele la estructura causal del proceso de Darwinismo Cuántico.

La cuarta y última parte ofrece la evaluación pormenorizada de la analogía (cap.7) en tres aspectos distintos, el metafórico, el formal y el isomorfismo sintáctico matemático (cap. 8).

Metodología

Los medios desplegados en este trabajo están de acuerdo con los objetivos anteriormente expuestos. Debido a la naturaleza interdisciplinar y multidisciplinar de la investigación, ha sido necesario un estudio pormenorizado de los problemas científico-filosóficos circunscritos a ámbitos del conocimiento científico como la naturaleza de la teoría de la evolución por

selección natural y las distintas interpretaciones de la teoría cuántica. Consecuentemente, se ha empleado el análisis histórico, conceptual y filosófico propio de cada disciplina, a saber: tanto de la historia y la filosofía de la biología como de la física.

Por otro lado, coincido plenamente con el papel que Max Jammer [Jammer, 1999, p. 1] asigna al análisis conceptual. Entre otras habilidades, requiere del conocimiento de las teorías y la crítica textual de las fuentes. A esta dificultad se añade el hecho de que el estudio de los términos debe anclarse a las definiciones precisas que propone cada ciencia. Aunque, como sabemos, no siempre es posible alcanzar la precisión conceptual deseable. Éste suele ser el caso de las nociones básicas, debido a su particular naturaleza o al origen todavía inmaduro de la disciplina [ib., 2].

En este trabajo, se pone énfasis en el análisis y crítica conceptual de términos científicos cuyo significado y uso pueden ser controvertidos en su aplicación en un contexto interdisciplinar. Como advertimos más arriba, el problema reside en que ciertos términos desbordan las categorías originarias para convertirse en nociones transversales que aparecen en todos los ámbitos del conocimiento.

En efecto, en la literatura científica, es común encontrar conceptos que requieren un tiempo para ser comprendidos y ajustados a los contextos particulares de la práctica disciplinar. En la historia de la ciencia, tal vez uno de los ejemplos más claros al respecto es la energía: el término griego *ἐνέργεια*⁴, ha mudado su significado conforme se han sucedido las distintas teorías científicas y filosóficas. Así lo evidencia su historia desde la noción de *vis viva* del siglo XVII, a las disputas de la naturaleza del calor y la luz de los siglos XVIII y XIX, al principio de conservación de la energía de Robert Mayer, pasando por su relación con la entropía en el segundo principio de la termodinámica, hasta evidenciar sus características cuánticas e incorporar su relación con la masa en la famosa ecuación de Einstein a principios del siglo XX.

Como veremos, actualmente, el término información es un concepto común que en la ciencia se interpreta a menudo de forma vaga e indefinida. Su aparente universalidad es fuente común de malentendidos. Por esta razón, en los estudios interdisciplinarios, el análisis conceptual se convierte en la herramienta metodológica fundamental. Éste facilita la elaboración de preguntas que puedan ser compartidas y asumidas sin ambigüedad por todas las disciplinas.

Por tanto, el método para abordar los problemas de la interdisciplinaridad pasa por precisar dichos términos y procurar aclarar si el ascenso semántico desde el uso material del lenguaje no ha introducido distorsiones y problemas espurios. Evidentemente, el análisis conceptual no se circunscribe exclusivamente al análisis del lenguaje.

Además del análisis histórico y conceptual, en este trabajo se favorece el análisis lógico y, sobre todo, el uso de herramientas teóricas de origen filosófico como el método de articulación para evaluar analogías creado por Paul Bartha.

⁴Con el sentido de acción para Aristóteles o de funcionamiento para Galeno [Sambursky, 2009, p. 148].

Parte I

LA FUENTE: EL DARWINISMO

Introducción

“No dudamos en afirmar que [la hipótesis de Darwin] es tan superior a cualquier hipótesis precedente [creacionismo] o contemporánea [la hipótesis de Lamarck], en la medida de la base observacional y experimental sobre la que descansa, en su método rigurosamente científico, y en su poder de explicar los fenómenos biológicos, como fue la hipótesis de Copérnico para las especulaciones de Ptolomeo. Pero las órbitas planetarias resultaron ser, después de todo, poco circulares y, como grandioso fue el servicio prestado por Copérnico a la ciencia, Kepler y Newton tuvieron que ir tras él. ¿Y si la órbita del darwinismo fuera un poco circular? ¿Qué pasa si las especies deben ofrecer *phaenomena* residuales, aquí y allá, no explicables por la selección natural? Dentro de veinte años, los naturalistas pueden estar en condiciones de decir si esto es o no es el caso; pero de todas formas se le debe al autor de ‘El Origen de las Especies’ una inmensa deuda de gratitud.” [Huxley, T.H. 1860, p. 569].

En esta cita del *Westminster Review* de 1860, Thomas Henry Huxley acuñó el término “darwinismo” como el conjunto de teorías basadas en la hipótesis de Darwin, la cual sostiene que “[...] todas las especies han sido producidas por el desarrollo de variedades de poblaciones comunes; por la conversión de éstos, primero en razas permanentes y luego en nuevas especies, mediante el proceso de selección natural [...]” [ib., 566].

No es habitual poder fechar con tanta precisión el nacimiento de un concepto, pero aún es más difícil encontrarlo descrito de forma tan sugerente mediante una analogía, que no sólo anticipa el impacto que tendrá dicho concepto en nuestra forma de ver el mundo sino que adelanta el proceso de revisión al que estará sometido.

El siguiente paso de nuestra investigación será averiguar la naturaleza de dicha hipótesis. Tal vez, y siguiendo con la comparación propuesta por Huxley, podamos precisar la hipótesis darwinista de forma tan directa, sencilla y estable en su devenir histórico como la hipótesis de Copérnico.

En una primera tentativa, se podría tomar como hipótesis de Darwin la definición ampliada que facilita T.H Huxley en la segunda cita que abre este capítulo: las especies han surgido a consecuencia del proceso denominado selección natural, que es esencialmente idéntico al proceso denominado selección artificial por el que el hombre ha originado las razas de los animales domésticos; la lucha por la existencia tomaría el lugar del hombre y

ejercería en el caso de la selección natural esa acción selectiva que realiza en la selección artificial [ib.569].

En este punto, parece que la analogía entre el darwinismo y el copernicanismo se puede mantener si en ambos casos, la hipótesis aludida por Huxley se refiere a entidades conceptuales complejas que sirven para representar cierto conocimiento sobre el mundo natural. Dicho de otra forma, para Huxley la hipótesis de Darwin, que encontramos resumida en esta cita, se debe entender como la teoría de la evolución por selección natural.

Ahora bien, como sabemos, el origen de un concepto no es más que el punto de partida de un complejo devenir histórico. Se puede aventurar que, en general, cualquier término que presente el sufijo -ismo, suele ser un conglomerado de doctrinas que son utilizadas para fijar la naturaleza del concepto a conveniencia del usuario.

En este sentido, es importante recordar que, para algunos académicos, la teoría de la evolución por selección natural no es el núcleo fundamental del darwinismo. De hecho, como nos muestra David Hull [1985, p. 773], muchos biólogos y filósofos de la biología no se ponen de acuerdo sobre qué es realmente el darwinismo. Este autor nos recuerda que, por ejemplo, Richard Lewontin afirma que la esencia de la revolución darwinista consiste en reemplazar una visión metafísica de la variación de los organismos por una materialista, o sea una “visión del mundo” [c.f. ib., 775]. Los seleccionistas al nivel del gen, como George C. Williams y Richard Dawkins, aseguran que ellos son los darwinistas puros en contraposición a los que apoyan la selección de grupo o en diferentes niveles [c.f. ib, 774]. Para algunos historiadores como Michel Ruse [1979, pp.18-19], la esencia del darwinismo se encuentra en el doble proceso de variación y selección. Ernst Mayr [1991] respalda esta opinión aunque enumera varias teorías distintas formuladas por Darwin - transformismo y materialismo, origen común, diversificación de las especies, pangénesis, teoría de la selección natural, selección sexual, etc. [ib., 102-119] - que corresponderían a conceptos distintos de darwinismo: (1) evolucionismo, (2) anticreacionismo (3) antiideología (antiesencialismo, antireduccionismo, y antifinalismo), (4) seleccionismo (5) evolución variacional, (6) credo de los darwinistas, (7) una nueva visión del mundo y (8) una nueva metodología. Para Mayr, algunas de las definiciones de darwinismo son claramente falsas o no son atribuibles en exclusiva al genio de Darwin [id.]. Por último, el paleontólogo S.J. Gould [2004, p. 35-36] sostiene que la esencia de la lógica darwiniana, que permanece casi intacta hasta nuestros días, se basa en un argumento central apoyado en tres compromisos mínimos cuya ausencia invalidaría la teoría, a saber: la variación, la herencia y la sobre producción de descendencia. Estos tres principios se enmarcaría en tres categorías que servirían de hilo a los debates sobre la vigencia de la teoría de Darwin: la agencia - el nivel al que opera el proceso darwinista-, la eficacia - el carácter creativo y no meramente negativo de la selección natural- y el alcance de esta teoría más allá de los procesos microevolutivos para explicar la taxonomía [ib., 37-39].

Según este análisis apresurado parece que la naturaleza de lo que sea el darwinismo está clara si no se entran a considerar los detalles. No obstante, como afirma David Hull, lo más preocupante, es que “[...] muchos científicos intenten ganar apoyo a su punto de vista,

no importándoles la magnitud de la diferencia con Darwin, arrojando un manto de Darwin sobre sus hombros” [op. cit., p. 777].

Como el objetivo de este trabajo es averiguar en qué circunstancias el Darwinismo Cuántico puede ser considerado un proceso análogo a la evolución por selección natural, el primer problema al que se enfrenta esta investigación reside en la caracterización o, en su defecto, la diferenciación entre diferentes tipos de darwinismo. Esta cuestión se complica si tenemos en cuenta tres circunstancias: (1) las distintas teorías evolutivas mantenidas por el propio Darwin a lo largo de sus investigaciones, (2) el devenir histórico de aquellas que se suponen forman parte de la tradición darwinista y (3), relacionada con las dos primeras, cierto presentismo a la hora de abordar la historia del darwinismo, debido a que el análisis de la teoría de la evolución por selección natural (TSN) y el entramado conceptual desgranado especialmente en las seis ediciones de *El origen de las especies* de Darwin, se suele acometer bajo el punto de vista de su versión más contemporánea, la denominada síntesis moderna, o de alguna de las múltiples teorías evolutivas actuales que aseguran formar parte de la filogenia teórica del darwinismo. Este enfoque diacrónico impone ciertos filtros conceptuales que pueden condicionar la comprensión de los problemas y retos a los que se enfrentó Darwin para explicar el cambio y la adaptación de los seres vivos en el contexto científico y sociocultural de su época.

Por lo tanto, si el objetivo de este preámbulo es encontrar los rasgos distintivos del darwinismo que puedan ser traducidos a una o varias recetas exportables mediante analogía, para coronar el programa con éxito, es imprescindible seguir la recomendación de Kitcher [1993, p.18], cuando advierte del peligro de elaborar “construcciones mínimas” del argumento darwiniano sin poner el debido cuidado en los detalles pues, tanto si lo que se pretende es entender las motivaciones que llevaron a Darwin a escribir *El origen de las especies* como si lo que se desea es precisar las diferencias entre la propuesta de Darwin y las de otros autores, se puede caer en importantes errores conceptuales. Como apuntábamos, la razón principal reside en que las teorías son entidades históricas y cualquier reconstrucción unificada debería dar cuenta de problemas metateóricos como, por ejemplo, el de la inconmensurabilidad de los distintos conceptos en las relaciones interteóricas, las distintas concepciones de las teorías y su relación con los modelos, etc.

En la primera parte de este trabajo, seguiremos el mencionado enfoque filogenético de la historia y la filosofía de la ciencia defendido por Lennox, según el cual, el estudio de la historia puede desvelar algunos de los problemas conceptuales y metodológicos de la ciencia ya que moldea sus fundamentos y métodos [op.cit. 2001, p.1].

Por este motivo, parece conveniente exponer una introducción histórica, todo lo detallada que permita el espacio de esta tesis, para fijar lo que denominaremos el “darwinismo de Darwin” [Gayon, 2009, p. 278]. En primer lugar, porque ya en la obra de Darwin se encuentran ciertos problemas que siguen siendo centrales en las teorías evolutivas contemporáneas como: la naturaleza probabilística y el papel del azar, las características del proceso de selección, la presencia de la explicación teleológica de la adaptación, la

naturaleza ontológica o epistemológica del concepto de especie y el gradualismo del proceso de selección natural [Lennox, 2011, p.83]. Y en segundo lugar, porque, como afirma Gayón, el darwinismo de Darwin no sólo ha marcado los debates conceptuales en biología evolutiva sino que además ha constreñido la orientación empírica de esta disciplina [ib., op. cit., 278]. Es más, como asegura este autor, el vigor del darwinismo en la actualidad descansa en la alta capacidad heurística de los conceptos introducidos por Darwin en el debate evolucionista [ib. 297]. Creemos que esta potencia conceptual para estructurar y abordar problemas relacionados con el cambio y la adaptación, se muestra evidente cuando términos propios del darwinismo como selección natural, lucha por la existencia, limitación de recursos, supervivencia, etc., se trasplantan a ámbitos diferentes de la biología. El darwinismo así entendido forma parte de una idea que desborda las categorías biológicas para convertirse en un principio explicativo universal [Castrodeza, 2009] como muestra el caso del Darwinismo Cuántico.

Consecuentemente, consideramos que este preámbulo histórico es necesario para que la posible construcción mínima de la TSN no caiga en interpretaciones interesadas, vaguedades conceptuales o simplificaciones que dañarían la capacidad de síntesis que pueden mostrar resúmenes precipitados. Además, tomados con la debida precaución conceptual propia del análisis histórico, creemos que las reconstrucciones, como la ofrecida al final del capítulo, pueden constituir el puente conceptual que conecta los argumentos descriptivos darwinistas aplicados a casos ejemplares y las formalizaciones posteriores de la teoría.

En definitiva, esta primera parte desea satisfacer tres objetivos: (1) distinguir las distintas hipótesis evolutivas que Darwin sostuvo a lo largo de sus investigaciones según parte de la historiografía actual, (2) establecer una receta del núcleo del “darwinismo de Darwin” con el objeto de analizar tanto sus bondades epistémicas como sus compromisos ontológicos y (3) ofrecer dos versiones que culminan el ascenso hacia la abstracción que ha experimentado la teoría de la evolución por selección natural, a saber, su representación matemática y su traducción al lenguaje de la información.

Para satisfacer estos fines, en el punto (1.1), se expondrá la aparición del concepto de tiempo profundo en relación a la variación, la adaptación y la extinción en el contexto de la denominada “Gran Escala del Ser”. En el apartado (1.2), se presentarán las distintas hipótesis que Darwin aventuró para explicar el cambio y la adaptación.

El extenso relato de cuestiones metodológicas, epistemológicas y ontológicas del “darwinismo de Darwin” se desarrollará en el punto (1.3). Es esencial comprender que la fuerza de la explicación darwinista se encuentra en el entrelazamiento de estas tres cuestiones. Se comenzará el apartado analizando la metodología seguida por Darwin que funde los métodos de la *vera causa* y la confluencia para acomodarlos a una ontología centrada en el individuo (1.3.1). A continuación, en (1.3.2) se estudiará la estructura del argumento según aparece en la obra capital de Darwin (1859). Posteriormente (1.3.3), se presentará la reconstrucción del razonamiento darwinista dividido en dos subargumentos: uno sincrónico y deductivo, el principio de selección natural (PSN), y otro diacrónico e

inductivo, su aplicación iterada. Ambos completan el argumento principal de la teoría de la evolución por selección natural (TSN). En la sección (1.3.4), se mostrará la naturaleza, sentido y alcance de la explicación de Darwin.

Apoyados en el análisis anterior, en el segundo capítulo no será necesario desarrollar detalladamente el devenir histórico de la teoría hasta el presente, ya que su objetivo es presentar sucintamente el ascenso hacia la abstracción del argumento darwinista para poder analizar la plausibilidad de la analogía formal entre los modelos matemáticos de la selección natural y el del Darwinismo Cuántico. Con esta finalidad, se describirá el proyecto neodarwinista desde los modelos matemáticos de la genética de poblaciones (2.1), que, en cierta manera, culmina con la representación matemática del proceso evolutivo según se expresa en la ecuación de Price (2.2) y su consecuente interpretación en términos del concepto de información de Fisher (2.3).

Concluiremos esta primera parte con un resumen de las distintas hipótesis evolucionistas aventuradas por Darwin a lo largo de su vida y un sumario de los conceptos esenciales de la teoría .

Capítulo 1

La Hipótesis de Darwin⁵

1.1. La invención del tiempo profundo en la Gran Escala del Ser: sobre la variación y la extinción de las especies en relación con la adaptación

Durante el Siglo de las Luces, se presentó un impulso organizador del conocimiento entre los naturalistas que encontró expresión impresa en las grandes obras de historia natural. Esta búsqueda de sistematización, que ya no estaba totalmente guiada por los motivos utilitaristas del pasado, puso al descubierto las dificultades para encontrar un único criterio interno bajo el que se pudiera organizar el mundo biológico. La concepción filosófica de un orden universal se basaba en tres principios ya formulados en la obra de Leibniz: plenitud -todo lo posible se puede encontrar en la realidad-, continuidad - *natura non facit saltus* - y gradación - jerarquización del mundo orgánico en una *scala naturae* - [Lovejoy, 1983, pp.180-183]. Esta concepción aplicada a los seres vivos influyó de forma determinante en la manera de inventariar los organismos, invitando a los naturalistas a buscar los especímenes de transición que completaran, sin resquicio, todos los peldaños de la escala natural obra de la divinidad.

Durante el renacimiento y la primera parte de la modernidad, la clasificación de los distintos organismos no se orientó con el objetivo de constituir una organización sistemática bajo algún principio ordenador como evidencian las distintas colecciones privadas de curiosidades y monstruos⁶. Como apunta González Recio [2004, p. 85], los taxonomistas del XVIII basaron sus clasificaciones principalmente en la morfología, concretamente en la estructura visible de los organismos, aunque también incorporaron principios de carácter fisiológico. Esta relación entre la estructura y la función mostraba que, a pesar de la preponderancia de una filosofía de tipo mecanicista, seguía presente el finalismo para satisfacer una explicación completa del orden natural.

⁵Parte del contenido de este capítulo ha sido publicado en el volumen 13, número 1 de la revista “eVolución” de la Sociedad Española de Biología Evolutiva.

⁶Véase por ejemplo la descripción del museo Wormiano en [Solis y Sellés, 2008, p. 332].

Según la historiografía del esencialismo, defensora de que las clases naturales deben mostrar ciertas esencias definidas caracterizadas en términos de condiciones necesarias y suficientes de propiedades intrínsecas invariables en el tiempo, en el centro de esta relación entre lo fisiológico y lo morfológico se encuentra el concepto de especie como clase natural real y elemento fundamental de la taxonomía. Si se procede a la clasificación eligiendo ciertas características como distintivas, entonces el problema se traslada a evaluar su idoneidad para representar la esencia de los organismos a clasificar. Con el objetivo de satisfacer este esencialismo, se emplearon dos estrategias principales para diferenciar las especies: uno basado en la reproducción, clasificación natural, y otro fundamentado en la semejanza de caracteres observables compartidos, clasificación artificial. En conclusión, el concepto de especie se convierte en el término central de la clasificación ya que “[...], además de poder ser reconocida atendiendo a las analogías morfológicas, manifiesta su presencia real y su constancia en la naturaleza a través de la sucesión de las generaciones” [ib., 186].

No obstante, esta manera de interpretar la sistemática del XVIII ha sido ampliamente criticada por la historiografía actual [c.f. Wilson, 2006]. En concreto, el enfoque esencialista de tipo aristotélico atribuido a la obra revolucionaria de Carl von Linné (1707-1778) ha sido contestado mediante un estudio detallado de los dos periodos principales en los que se puede dividir su trabajo de clasificación de la naturaleza⁷.

El carácter esencialista y fijista del primer periodo de la obra de Linneo debe considerarse a la luz de la interpretación teológica medieval de la obra de Aristóteles. Es decir, la clasificación linneana no surgiría al dictado de la lógica aristotélica como proponían la historiografía clásica [Nuño, 2011]. Como se demuestra en su obra *Genera Plantarum* de 1737, Linneo encontró inspiración en un principio fundamental: la existencia de un orden en el mundo es el reflejo inmutable del plan de un Ser Supremo, en el que “hay tantas especies cuantas ha producido desde un principio el ser infinito”⁸. Esto implica que, como afirma Laura Nuño, el fijismo y esencialismo del joven Lineo “[...] sólo resulta inteligible a la luz de los presupuestos ontológicos de la dogmática cristiana.” [ib., 17]. De hecho, para clasificar los seres vivos, Linneo aplica el método de la diversidad lógica - o método del “género” y la “diferencia” - basado en la lógica porfiriana donde el género es una clase y la diferencia es una propiedad esencial -un predicado - que separa las clases agrupadas en el género⁹ [id.]. Debido a la imposibilidad práctica de tener en cuenta todas las propiedades pertenecientes al género, Linneo elegirá algunos rasgos, como el de la reproducción, para llevar a cabo su taxonomía. De los cinco niveles en que se divide la clasificación linneana - la clase, el orden, el género, la especie y la variedad - el naturalista sueco defenderá una posición realista con respecto al género y a la especie y optará por una postura nominalista para el resto [ib., 18]. Más específicamente, los géneros se consideran clases naturales fijas

⁷Agradecemos a Laura Nuño de la Rosa sus inestimables aclaraciones y las referencias bibliográficas que sirven de guía para el estudio de este apartado: [Nuño, 2005; 2011].

⁸apud. [Jahn et al., 1989, p. 244].

⁹Como recuerda Nuño [2005, 79] para Aristóteles la especie era sujeto de la predicación y no un predicable en contraste con la lógica porfiriana.

y centro de la taxonomía, ya que las especies se clasificarán aplicando el método de la diferencia a los géneros y, en muchos casos, su adscripción taxonómica será controvertida. No obstante, este procedimiento taxonómico se mostrará demasiado rígido y termina por fracasar en la práctica. De ahí que Linneo introduzca un cambio metodológico a partir de 1753 derivado de la propia práctica biológica. Éste se resuelve en el uso de los denominados géneros modulantes que surgen de la eliminación de los rasgos no compartidos entre la especie más representativa del género y las restantes.

Este enfoque biológico en la definición del género convirtió en central el concepto de especie y renovó el interés por el estudio de las variedades. En efecto, la especie tomará un nuevo significado cuando Linneo establezca el conjunto de reglas que sirven para la denominación binaria latina incontrovertible de los taxones animal y vegetal. La simplificación derivada de esta terminología, motivada por cuestiones prácticas, y la consecuente diferenciación entre la denominación y la definición de especie, terminó con el esencialismo. En este periodo, la especie suele coincidir con la variedad más conocida lo que supone un estudio más exhaustivo de las variedades que coadyuvó a la introducción del parámetro temporal y la revisión del fijismo: la hibridación de especies de distintos ordenes habría dado lugar a otras especies, cuya mezcla produciría la variabilidad observada [op. cit. 2005, p. 85]. Esto, como sostiene David Alvargonzález, pudo servir de antecedente al transformismo [c.f. ib., 74].

En este sentido es importante resaltar la obra de George-Louis Leclerc, conde de Buffon (1707-1788). Para el naturalista francés, la taxonomía sólo es reflejo de nuestra forma de clasificar y no de la existencia de las especies como clases naturales reales¹⁰. No obstante, conforme Buffon avanza en el estudio de los seres vivos en su obra magna, *Histoire naturelle, générale et particulière*, parece entrever cierto realismo en el concepto de especie que define en términos de capacidad de reproducción con descendencia fértil. Si se garantiza la descendencia ininterrumpida, cada especie -afirma Buffon- “hoy es igual que hace tres mil años”¹¹. Así pues, en un primer periodo, Buffon sostiene claramente una posición fijista en la que las diferencias entre las especies es a veces mínima¹². Su conversión al transformismo se puede encontrar en el tomo XIV de su magna obra dedicado a la degeneración de los animales de 1766. En ella mantiene que bajo la influencia del medio (clima, alimento, etc.), la especies podían variar¹³. Aunque estas variaciones, advierte Buffon, son menos amplias

¹⁰“ [...] cada uno de estos métodos es, a decir verdad, un diccionario en el que encontramos los nombres en un orden relativo [...] y, por consiguiente, tan arbitrario como el orden alfabético; pero la ventaja que podemos derivar de ella [la clasificación] es que al comparar todos estos resultados encontraremos finalmente el verdadero método, que es la descripción completa y la historia exacta de cada cosa en particular” [Buffon, 1749, vol. I, p.24].

¹¹apud. Jahn, op.cit., 225.

¹²“[...] aunque las diferentes especies de animales están separadas unas de otras por un espacio que la Naturaleza no puede sobrepasar, sin embargo, algunas de ellas se aproximan tanto unas de otras en tantos aspectos que sólo queda espacio suficiente para introducir una línea de separación entre ellos.” [Buffon, 1756, vol.V, p. 59].

¹³“El gran trabajador de la Naturaleza es el Tiempo”, su uniformidad y sucesión, cambian gradual e

en los animales en estado silvestre que en los domésticos, porque los primeros pueden elegir su comida y el clima [ib., 60].

En resumen, todos los naturalistas posteriores a Linneo y Buffon fueron conscientes de la imposibilidad de sostener una total inmutabilidad de las especies. La cuestión central se formulaba en términos de la posibilidad o imposibilidad de que la variación traspasara ciertos límites.

1.1.1. Sobre la extinción de las especies y su relación con la adaptación

La cuestión sobre la variación de los organismos tomó un cariz nuevo cuando se pretendió explicar la extinción de las especies evidenciada por el registro fósil. Ésta se consideraba la prueba más contundente de las limitaciones de la variación posible, puesto que comúnmente se aceptaba la perfecta adaptación de los animales al medio.

Bajo este marco conceptual se interpretó la naturaleza de los fósiles. Estos restos extintos de seres del pasado suponían un reto para la nueva sistemática ya que: (1) tanto las plantas como los animales fosilizados no se correspondían con las especies conocidas, (2) se encontraban ubicados de forma ordenada en estratos que mostraban la discontinuidad entre las formas orgánicas, (3) en algunos casos, como el de los fósiles marinos, se localizaban en lugares insospechados como en cadenas montañosas y (4) algunos fósiles procedentes de estratos más recientes presentaban afinidades morfológicas con especies vivas.

El problema de la extinción constató la íntima relación que existía entre la geología y la historia de la vida en la Tierra¹⁴. Este descubrimiento del tiempo profundo fue un producto de la nueva geología en el que debería encontrar acomodo cualquier visión panorámica de la historia natural. Por este motivo, era necesario que la solución al problema de la variabilidad de las especies y de la naturaleza de los fósiles coincidiera con el relato geológico de la escuela correspondiente.

Los diversos argumentos antievolucionistas y la posición de sus defensores con respecto al problema de la extinción y la adaptación, se pueden agrupar en dos posturas que corresponden a las dos teorías geológicas principales: el catastrofismo y el uniformismo.

En sus *Lecciones de anatomía comparada*, Georges Cuvier (1769-1832) formuló el principio funcional de su morfología como sigue: “[...] las leyes que determinan las relaciones de los órganos se fundan en su dependencia funcional mutua y en la ayuda que se prestan unas a otras [...]” [apud. Gould, 2004, p.322]. De ahí concluye que “[...] una armonía apropiada entre los organismos que actúan unos sobre otros es una condición de existencia necesaria [...]” y, por lo tanto, “[...] si una de estas funciones se modificara de manera incompatible con cualquier modificación de los otros órganos, dicha criatura no

imperceptiblemente las cosas, aunque su agregación durante largos periodos las torna “perceptibles, y se muestran finalmente en resultados sobre los cuales no puede haber error” [Buffon, 1766, vol. VI, p.59].

¹⁴Sin duda, como decía Paolo Rossi “los seres humanos en la época de Hooke (s.XVII) tenían un pasado de seis mil años, aquéllos de los tiempos de Kant fueron conscientes de un pasado de millones de años” [Rossi, 1979, p. 11-12].

podría existir.” [íd.]. Así pues, la estructura de los seres vivos es un sistema integrado, lo que significa que cualquier cambio en una de las partes del organismo altera el conjunto. Las consecuencias derivadas de este enfoque parecen irrefutables: el principio funcional de correlación de órganos se relaciona estrechamente con el concepto de adaptación perfecta, puesto que cualquier sensible alteración del medio, o como lo califica Cuvier “cambio en las condiciones de existencia”, puede llegar a perturbar alguno de los órganos de un ser vivo provocando una reacción en cadena en todo el organismo que lo llevará a la ruina. Por lo tanto, el cambio de las condiciones de vida del organismo puede mostrar cierta holgura, que impone un límite de variación permitido al individuo, más allá del cual, éste perecerá.

De lo expuesto, se puede llegar a dos conclusiones principales: (1) cuando en un lugar encontramos fósiles, el registro estratificado de los mismos se corresponde con el relato temporal de cambios bruscos en la geología y las condiciones de vida en ese lugar - teoría de catástrofes o cataclísmica - que causaron la aniquilación de las formas de vida existentes y (2) el hecho de que no se encuentren formas de transición es una prueba más de que no ha habido transmutación de las especies sino suplantación de nuevas procedentes de otras regiones pues, según Cuvier, no es necesario afirmar “ [...] en absoluto la necesidad de una nueva creación de las especies vivas [...] ”¹⁵.

Ahora bien, si la cuestión que se debía explicar era el origen y naturaleza de los fósiles, la teoría de los cataclismos junto a la teoría de las migraciones dejaban abierta la posibilidad de que existieran grandes zonas de la Tierra sin explorar donde podrían encontrarse las especies supuestamente extintas.

Esta solución satisfacía también plenamente a otra tradición muy distinta de la seguida por Cuvier¹⁶. Los teólogos naturales no podían aceptar que se hubiera producido un error en la Creación: los seres vivos mostraban una adaptación perfecta fruto del supremo entendimiento divino. La famosa analogía del relojero, presentada por el reverendo William Paley (1743-1805) en su *Natural Theology* [1802, p.16], defendía el ajuste perfecto entre los organismos y el medio. Como se recordará, el argumento del relojero¹⁷ funciona como un razonamiento inductivo a *posteriori* en el que se establece una analogía entre el diseño o propósito de objetos - el reloj - cuya factura es humana y el diseño del universo que en su infinita complejidad y magnificencia requiere del supremo intelecto divino¹⁸.

¹⁵apud. [Jahn, op.cit. 261].

¹⁶Recordemos que el pensamiento de Cuvier está orientado a cuestiones relacionadas con la adaptación en sentido de la organización interna derivada de los cuatro planos de dependencia funcional y su relación con el ambiente.

¹⁷Este razonamiento y el propio libro escrito por Paley, texto de referencia en las universidades británicas, se consideraban el canon de la explicación biológica en lo que respecta a la perfecta adaptación de los seres vivos al medio.

¹⁸Aunque pueda parecer que el relato de los teólogos naturales se alejaba de los procedimientos científicos aceptados en la época, lo cierto es que la solución al problema de la extinción -cataclismos e inmigración de nuevas especies- mostraba lo que los naturalistas, siguiendo el criterio del gran Cuvier, entendía como buena metodología científica: el conocimiento debe apoyarse en el soporte empírico y no se deben formular hipótesis incontrastables, como la creación de especies. En otros términos, el naturalista debe dedicarse al trabajo de

Ahora bien, ¿hasta qué punto las catástrofes globales constituían una evidencia observacional? y ¿qué explicación se podía aportar en el caso de especies extintas en lugares cuyo aislamiento geográfico hiciera poco plausible la llegada de otras especies? Algunos teólogos naturales y naturalistas en general defendían que las especies podían surgir de creaciones *ex novo* mediadas por la intervención puntual divina.

En sus *Principles of Geology*, Sir Charles Lyell (1797-1875) era firme defensor del uniformismo geológico y basaba su fijismo teísta en tres premisas: (1) el actualismo, los acontecimientos del pasado geológico han sido causados por fenómenos de naturaleza similar a los que operan en el presente - e.g. erosión del agua, erupción de los volcanes, cambio brusco de temperaturas, etc. -; (2) el uniformismo, los cambios geológicos lentos y continuos al acumularse causan efectos a escala monumental; y (3) el equilibrio dinámico, el tiempo geológico es cíclico y muestra fases alternas de creación y destrucción, por lo que el estado dinámico de la Tierra es estacionario y su historia, incluyendo en ella a los seres vivos, no es direccional. Con estos principios y, como veremos más tarde, aplicando a la geología los métodos newtonianos fundados en las causas verdaderas, Lyell se propuso establecer el verdadero método científico. Aunque rechazaba el catastrofismo de Cuvier¹⁹, siguiendo su funcionalismo concluyó que como los seres vivos estaban perfectamente adaptados al ambiente, el cambio continuo y fluctuante de las condiciones de existencia, la incapacidad de algunos organismos para la emigración y la nueva relación con especies inmigrantes tiene como consecuencia “ [...] que las especies que existen en un período determinado deben, a lo largo de los siglos, extinguirse una tras otra. «Deben morir», para tomar prestada la expresión enfática de Buffon, « porque el tiempo pelea contra ellos. »” [Lyell, 1854, vol. II, p. 176]. Este concepto de extinción propuesto por Lyell se aproxima mucho a lo que se entiende por selección natural negativa limitada. El geólogo escocés incluso llegará a afirmar que “en la lucha universal por la existencia, prevalece el derecho del más fuerte; y la fuerza y durabilidad de una raza depende principalmente de su fecundidad [...]” [ib., 56].

Antes de investigar las leyes generales de introducción de especies nuevas, Lyell estudió las hipótesis que limitan su duración²⁰ y que no dependían de una acción catastrófica como lo sería, por ejemplo, el impacto de un cometa. Finalmente, basándose en el principio de equilibrio dinámico que, como se recordará, conduce a los sistemas a la estabilidad, Lyell consideró que el número de especies se debía mantener constante. De hecho, pensaba que las especies se formaban independientemente unas de otras en pequeños grupos. Ahora

observación, recolección y catalogación y la teorización, que en general no estaba bien vista, debe evitar cualquier atisbo de especulación.

¹⁹Contra Cuvier y los catastrofistas, afirmaba: “Nunca hubo un dogma más calculado para fomentar la indolencia, y para romper el afilado borde de la curiosidad, que esta suposición de la discordancia entre las antiguas y las actuales causas de cambio.”[Lyell, 1854, vol.II, p. 421].

²⁰Por ejemplo, tuvo en cuenta y posteriormente rechazó [ib., cap.VIII] la hipótesis de extinción de especies constante y regular propuesta por Giovanni Battista Brocchi (1772-1826). El naturalista italiano presentó un argumento analógico entre las causas internas que limitan la longevidad de los individuos y la “energía” vital de las especies.

bien, el geólogo escocés se preguntaba si era posible que “nuevas especies puedan ser llamadas a la existencia de vez en cuando, y sin embargo ese asombroso fenómeno pueda escapar a la observación de los naturalistas.” Por supuesto, la hipótesis debía “considerar las evidencias que podemos esperar en el estado actual de la ciencia”. El equilibrio dinámico impuso a Lyell “imaginar la sucesiva creación de especies que constituya, como su extinción gradual, una parte regular de la economía de la naturaleza” [ib., 179]. Aunque existían otras posibles explicaciones²¹, los naturalistas descubrían anualmente una gran cantidad de especies nuevas, incluso en zonas habitadas por naciones civilizadas. Además, la evidencia geológica reflejaba claramente una sucesión de especies agrupadas en estratos de forma simultánea. Es más, no era infrecuente encontrar especies muy distintas que compartían ambientes muy parecidos. Por último, Lyell debía dar cuenta de la distribución geográfica de las especies [Ruse, 1983, pp.105-107]. Su argumento básico se apoyaba en la ley de tipos sucesivos: siguiendo su modelo geológico dinámico, el movimiento aleatorio de los continentes crea variaciones del clima que incide en las especies de forma consecutiva, sucediéndose así periodos de creación y extinción de especies. Si bien era consciente de la alta improbabilidad de poder observar la aparición de nuevas especies, Lyell pensó que no se podía descartar su creación, ya que sustituirían a las especies extintas aunque, por supuesto, siguiendo las leyes de la naturaleza diseñadas por el Creador²².

Así pues, para todas las especies salvo la humana, se debería buscar una ley natural que mediante una cadena de “causas intermedias”, evidenciara el proceso de creación de nuevas especies. El descubrimiento de esta cadena causal desvelaría “el misterio de los misterios” sin necesidad de acudir a la intervención sobrenatural directa, salvo en el caso de los humanos. Pero ¿era posible encontrar una ley de fenómenos puntuales inesperados? Sir Charles Babbage (1791-1871) propuso una analogía para explicar la naturaleza causal de fenómenos aparentemente milagrosos: al igual que las máquinas de calcular diseñadas por el mismo Babbage mostraban inopinadamente un resultado que se salía completamente de la sucesión prevista, las leyes de sucesos extraordinarios, como la creación de una nueva especie, formarían parte de una ley general que explicaría los eventos irregulares junto a una dinámica regular²³.

²¹Como la inmigración de especies de otros lugares ya comentada.

²²Esta hipótesis de creaciones sucesivas descartaba la idea de progreso de Lamarck, por lo tanto no hay dirección en la sucesión de especies. Pero el teísmo de Lyell no podía evitar encontrar una excepción a la regla: la aparición del ser humano sobre la Tierra se explicaba mediante un proceso creativo especial e independiente con respecto al resto de los primates. Esta cuestión, como veremos más adelante, también es contraria a la teoría de Lamarck, pues el naturalista francés colocaba al ser humano como cúspide de su sistema progresivo.

²³La inteligencia divina mostraba su magnificencia al diseñar leyes de lo anómalo [Ruse, 1983, p. 116]. Según Michael Ruse [ib., p.117], el argumento de Babbage es muy relevante porque reflejaba el funcionamiento del proceso de secularización: la conversión de los milagros en leyes naturales estaba mediada por analogías mecánicas donde la máquina sustituiría al diseño providencial.

En resumen, Lyell aportó soluciones al problema del registro fósil y la distribución de las especies mediante un modelo fijista que se puede caracterizar por seis leyes²⁴: (1) las variaciones del entorno pueden modificar (en función y forma) a un individuo pero no ilimitadamente; (2) es posible que la descendencia herede estas modificaciones; (3) la desviación entre progenitor y prole es limitada; (4) cada especie tiene su origen de un grupo inicial; (5) no es posible la mezcla interespecífica; y (6) las especies son muy longevas.

1.1.2. La primera solución transformista al problema de la extinción

Las cuestiones en torno a los límites de la variación, la adaptación y la extinción se abordaron también desde una óptica transformista.

Para el deísmo materialista de Jean Baptiste de Monet, caballero de Lamarck (1744-1829), los principios de plenitud, continuidad y gradualismo, en los que se basaba la armonía de las leyes naturales, eran contrarios a la extinción y favorables a una transformación continua y gradual guiada por la intervención del medio: el cambio del entorno impone y el organismo, guiado por su “voluntad interna”, propone soluciones que se adaptan a las nuevas circunstancias. En el proceso de transformación, se mantiene el ajuste perfecto entre el organismo y el entorno en todo momento, esto es, se mantiene la idea de una adaptación perfecta. La evolución lamarckiana es progresiva e incluiría al ser humano como especie derivada del orangután. Como transformista y defensor del tiempo profundo, Lamarck consideraba que, para explicar la extinción, era inaceptable la hipótesis catastrofista de Cuvier²⁵, ya que no había pruebas de la existencia de cataclismos de orden universal. Lo único que se podía observar eran “desórdenes locales” cuyos resultados se conocían. Por lo tanto, la hipótesis catastrofista contradecía la evidencia observacional, puesto que la Naturaleza operaba sin brusquedad, lenta y gradualmente [Lamarck, 1986, pp. 69-70].

En resumen, además del transformismo a gran escala propuesto por Lamarck que rompía con los límites específicos, podemos concluir que en el primer cuarto de siglo XIX todo naturalista admitía cierta variación en las especies. También había un acuerdo en que la amplitud de la variación era mayor en las especies domésticas que en las silvestres. La mayoría de los naturalistas pensaban que el límite infranqueable era el interespecífico y se asumía una adaptación perfecta entre el organismo y el medio dentro de cada especie. Además, el problema de la variación se relacionaba estrechamente, mediante el concepto de adaptación perfecta, con el problema de la extinción de especies, evidenciado por el registro fósil. Las teorías geológicas dominantes, el catastrofismo y el uniformismo, y la concepción morfológica de los seres vivos, ya fuera ésta formal o funcional, servían de marcos teóricos

²⁴Adaptado de Castrodeza [1988, p. 139].

²⁵El ataque contra el catastrofismo de Cuvier también se produjo desde la biología romántica. La *Natürphilosophie* impulsó una visión de la naturaleza, que mostró una especial influencia en morfología donde aparecieron distintas teorías formalistas basadas en el concepto de arquetipo como unidad de forma, dinámica y organicista. A este grupo de morfólogos perteneció, entre otros, Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), quien propuso una teoría de la unidad estructural entre los peces y los demás vertebrados. Véase Gould [2004, pp. 326-335].

explicativos donde se debían analizar las consecuencias que los cambios en las condiciones de existencia imponían a la variabilidad de las especies y a su eventual extinción. Además, para que las teorías evolucionistas pudieran ser reconocidas por la comunidad investigadora, era imprescindible satisfacer las condiciones de los cánones imperantes sobre lo que se consideraba una buena metodología científica. Si, por añadidura, se pretendía incorporar el evolucionismo al ideario común como principio general de la naturaleza, entonces la estrategia a seguir requería de la secularización del pensamiento biológico merced a la sustitución del papel del Creador por un proceso fijado mediante leyes naturales.

1.2. El Darwinismo de Darwin

1.2.1. La formación de un joven naturalista inglés

Charles Robert Darwin²⁶ era un caballero de la clase alta inglesa, clérigo y naturalista incipiente que a decir de su mentor, John Stevens Henslow (1796-1861), poseía buenas dotes como coleccionista, era observador y el hombre que precisaba la expedición HSM Beagle. En aquellos tiempos, Alexander von Humboldt (1769-1859) era el naturalista por excelencia²⁷. Darwin leyó con fruición la obra del científico alemán en la que encontró no sólo inspiración, sino también la idea de que la Naturaleza funciona como una red intrincada de conexiones entre el medio físico y el biológico, y que para descifrarla, era necesario interrelacionar todos los resultados que aportaban las ciencias naturales [Sloan, 2009, p. 28].

Además de la obra de Humboldt, parece que el joven Darwin también quedó impresionado por la lectura del libro de Paley, *Natural Theology*, y por el ensayo de metodología de la ciencia *Preliminary discourse on natural philosophy* del astrónomo y newtoniano John Herschel (1792-1871) a quien pudo visitar personalmente cuando el Beagle realizó escala en el Cabo de Buena Esperanza. Como veremos, este manual de principios y métodos de la ciencia introdujo a Darwin en la doctrina de la vera causa, pues al no ser observable directamente la transformación de las especies mediante selección natural, Darwin encontró una causa verdadera análoga, o sea empírica, en la selección artificial que aportó plausibilidad a la explicación del cambio gradual, la adaptación, la extinción y la divergencia de las especies silvestres.

Estas tres obras formaron parte del bagaje intelectual de Darwin, que comenzó en Edimburgo en octubre de 1825, donde tomó su primer contacto académico con las distintas disciplinas de la historia natural²⁸. Tras abandonar los estudios de medicina, debido a la

²⁶De la inmensa bibliografía sobre la vida de Darwin se pueden destacar dos biografías [Desmond y Moore, 2009] y [Browne, 2008].

²⁷En sus *Personal Narratives*, Humboldt describe vivamente la geología, geografía, clima, fauna y botánica de aquellos lugares que visitaba. En este relato, el paisaje y el paisanaje se encuentran íntimamente entrelazados: la preocupación por la antropología queda inserta en su marco natural, desde las condiciones de vida hasta el estudio de las lenguas y dialectos de las tribus que encontraba en su recorrido.

²⁸En la capital escocesa, se produjo la primera incursión profesional de Darwin en la historia natural: su interés por los invertebrados, culminó con su primer artículo, merced a la investigación que realizó en colaboración con

aversión que le causaron las prácticas de disección y las sesiones a las que acudió en el teatro de operaciones del hospital [Darwin, 1887, pp. 47-48], el joven Darwin se matriculó en la Universidad de Cambridge con el objetivo de completar la formación necesaria para poder ejercer de clérigo de la iglesia anglicana. Allí continuó su formación como naturalista y conoció al filósofo de la ciencia y catedrático de mineralogía William Whewell, de quien aprendió otra metodología científica complementaria a la de Herschel, el método de las confluencias: si las causas no son accesibles, para poder encontrar una vera causa, las distintas disciplinas o áreas científicas pueden confluir en un mismo principio, la misma causa²⁹.

Así pues, el joven naturalista emprendió el viaje en el Beagle con el objetivo de investigar los aspectos de la historia natural que más le habían interesado y de cuyo conocimiento se sentía más seguro como la geología y los animales invertebrados [Bowler, 1990, p. 67].

Dos son los hitos que es necesario destacar sobre la expedición del Beagle para entender el desarrollo del pensamiento de Darwin. Como se ha apuntado más arriba, el primero es la influencia determinante que le causó la lectura de los dos primeros volúmenes de los *Principles of Geology* de Lyell³⁰. En otros términos, Darwin se proclamaba partidario del uniformismo y actualismo en geología. Esto significó, además, una adhesión a la metodología científica de Lyell, que utilizará de modelo cuando emprenda la teorización sobre la historia de la vida. Además, en el segundo volumen de este tratado de geología, Darwin estudiará las distintas soluciones al problema de la extinción y las ideas evolucionistas de Lamarck a través de la exposición crítica de Lyell ya comentada.

El segundo hito está relacionado con varias expediciones que, una vez Darwin estuvo de vuelta en Inglaterra, serían importantes en sus especulaciones transformistas: (1) en la Pampa, donde encontró una especie desconocida de ñandú que compartía hábitat con el ñandú común; (2) en sus expediciones por el sur del continente americano - una desde Bahía Blanca a Buenos Aires y otra posterior a la Patagonia-, en la primera, recolectó fósiles similares a algunas especies vivas como armadillos, dos ejemplares gigantes -uno de un oso (*Megatherium*) y otro de un roedor (*Toxodon*)- y, en la segunda, los restos de un tipo de camélido primitivo (*Macrauchenia*); y, por último, (3) su famosa estancia en las Galápagos.

el zoólogo y anatomista Robert Edmond Grant (1793-1874), seguidor tanto del transformismo de Lamarck como de la teoría morfológica formalista de Geoffroy. Probablemente, durante ese curso, Darwin escuchó por primera vez las teorías geológicas uniformistas y plutonianas del geólogo escocés James Hutton (1726-1792). Así mismo, Darwin asistió a las lecciones de historia natural sobre fósiles, geología y clasificación de Robert Jameson (1774-1854), que era discípulo del neptunista Abraham Werner (1749-1817). En las conferencias del ornitólogo John James Audubon (1785-1851), Darwin aprendió sobre los hábitos de las aves de América del Norte y fue instruido en el uso de alambres con los que fijar a los especímenes para facilitar su estudio [Darwin, 1958, p. 50].

²⁹Como se verá cuando se estudie la estructura del “Essay” de 1844 y de “El Origen de las Especies”, Darwin combinó las metodologías de Herschel y de Whewell para que su “largo argumento” proporcionara una explicación científica adecuada a las exigencias de su época.

³⁰En efecto, durante el viaje -en agosto de 1835-, Darwin ya se había convertido en “un ferviente discípulo de la concepción de Mr. Lyell, como se da a conocer en su admirable libro” [apud. Bowler, 1990, p. 78].

El 15 de septiembre de 1835, el Beagle fondeó en el archipiélago de las Galápagos, un grupo de una decena de islas de origen volcánico situadas sobre el ecuador a casi mil kilómetros de la costa continental sudamericana. Durante las cinco semanas que duró la exploración de las “Islas Encantadas”, Darwin demostró tener importantes lagunas en sus conocimientos de zoología [Sulloway, 1982, p.49]. El caso más conocido de su descuido como naturalista lo constituye la famosa recolección de los pinzones de las Galápagos: salvo por una referencia sin transcendencia, Darwin no consideró cuestión alguna sobre estas aves en su diario de viajes³¹. En este punto es importante recordar que las discusiones sobre la clasificación de los pinzones, reflejadas en la edición de 1845 de su “Diario de Investigaciones”, son una reelaboración en retrospectiva de su pensamiento una vez se había convertido al transformismo [ib., 5].

Paradójicamente, la incapacidad de Darwin para reconocer la diferencia taxonómica entre una variedad y una especie en los pinzones fue un acontecimiento importante en su conversión al transformismo una vez que, ya en Inglaterra, puso las colecciones en manos de especialistas. Según nos relata Castrodeza [1988, p.130], Darwin mantuvo una controversia con FitzRoy sobre la clasificación de los pinzones: el capitán defendía que la inteligencia suprema del Creador había situado especies distintas para cada isla, mientras que Darwin afirmaba que eran variedades pues no imaginaba a Dios ocupándose de cuestiones de detalle. Tras la incorporación de los ejemplares aportados por FitzRoy, que empeñado en demostrar la diferencia específica de cada tipo de pinzón había recolectado y asignado correctamente su procedencia, el eminente ornitólogo británico John Gould (1804-1881) resolvió la polémica en contra de Darwin: determinó que en la muestra completa de pinzones se podían contabilizar treinta especies de cuatro grupos distintos [Bowler, 1990, p. 80]³².

La dificultad para diferenciar entre variedad y especie es una de las claves relevantes para poder entender el origen de la investigación sobre evolución emprendida por Darwin. Conforme avance en su idea transformista, irá abandonando un concepto tipológico de especie hacia cierto nominalismo. Dicho de otra manera, con el tiempo parece que Darwin advierte que no es posible definir la especie como una categoría o clase natural y que los distintos niveles de clasificación no reflejan una existencia objetiva. Nos atrevemos a opinar con Gayon [2009, p. 301] que el concepto de especie toma significado dentro del pensamiento evolutivo de Darwin y, por lo tanto, está condicionado por cuestiones de tipo pragmático.

³¹Según Sulloway, de hecho, Darwin sólo tomó muestras incompletas de estas aves e incluso no etiquetó su procedencia insular, por lo que se confundió posteriormente cuando quiso establecer su localización. Darwin no logró relacionar los distintos tipos de picos con el plumaje y la localización, por eso no clasificó correctamente estas aves [ib., 10].

³²Recordemos que la última decisión para establecer la taxonomía dependía de la opinión de un experto en morfología, este método restaba objetividad a la decisión, pues descansaba finalmente en el principio de autoridad. Para que se pueda entender la dimensión del problema de la clasificación, tal vez sea ilustrativo saber que actualmente no hay una definición de especie que sea aplicable a todas las disciplinas de la biología. De hecho, si atendemos a la sistemática actual, los llamados pinzones de Darwin se pueden clasificar en catorce especies de cinco géneros.

En resumen, los académicos consideran que, durante su viaje alrededor del mundo y seguramente fruto de su condición social y formación, Darwin no sólo era partidario de la estabilidad temporal de las especies, sino que de hecho la propia visita a las Galápagos no hizo más que confirmar esta creencia. Como se evidencia en el ejemplo de los pinzones, Darwin empezará a especular sobre el evolucionismo una vez aparezcan las primeras conclusiones de los especialistas sobre la naturaleza y clasificación de los distintos ejemplares de su colección.

1.2.2. El tiempo como motor de la secularización del pensamiento biológico: las soluciones transformistas de Darwin

Los historiadores³³ que han analizado el periodo de redacción de los libros de notas de Darwin sostienen que tanto su conversión al transformismo como el descubrimiento del principio de selección natural fueron graduales.

El Cuaderno Rojo: la primera hipótesis transformista.

Charles Darwin introduce sus primeras especulaciones transformistas en el denominado *Red Notebook* [RN, pp. 127-131]³⁴ en torno a marzo de 1837. En este cuaderno, se distinguen claramente dos partes: la primera, redactada durante el viaje del Beagle, trata de geología y la segunda, a la que pertenece la referencia apuntada, versa principalmente sobre las especies y su escritura pertenece al periodo londinense.

Como se ha comentado más arriba, en la conversión de Darwin al transformismo tuvo un papel fundamental su dificultad para distinguir entre variedades y especies. Tras los resultados preliminares de los estudios realizados por el anatomista Richard Owen (1804-1892) y por el ornitólogo John Gould sobre la colección de fósiles encontrados en Sudamérica, Darwin se pregunta en [RN, p. 127] sobre la relación posible entre los dos tipos de avestruces encontrados en la Pampa, el ñandú común (*Rhea americana*) y el ahora denominado ñandú de Darwin (*Rhea pennata pennata*). El naturalista inglés no entendía que dos especies tan parecidas compartieran el mismo entorno salvo que la “más grande invade a la menor.- [y se dé un] cambio no progresivo: producido de una sola vez” [id.]. Ahora se produce, lo que Castrodeza llama “una solución de emergencia” [op.cit.125]: en vez de abogar por un cambio gradual imperceptible, al modo de Lamarck, Darwin defiende

³³En esta sección, principalmente con la ayuda y guía de Castrodeza [2013 y 1988, pp. 89-149] y de [Hodge, 2009, pp. 44-71], se van a presentar, muy sucintamente, las distintas teorías transformistas exploradas por Darwin entre 1837 y 1839 en los denominados cuadernos de notas, cuya redacción corresponde a la época en que Darwin se encontraba afincado en Londres. Darwin enunciará distintas soluciones tentativas al problema de las especies, que llegarán a convertirse en lo que denominaría como “su teoría”. Estos pasos intermedios y sus argumentos correspondientes representan guías para entender no sólo su pensamiento posterior sino también toda la tradición autodenominada darwinista. Todas las referencias a los libros de notas se han obtenido del proyecto de archivo digitalizado *Darwin on line* <http://darwin-online.org.uk/> durante el mes de marzo de 2016. Se citarán por sus siglas respetando la manera en que lo hace la historiografía especializada.

³⁴Este cuaderno de notas lo editó Herbert, S. en. 1980.

que sólo quedan dos posibilidades: “Si una especie cambia en otra debe ser *per saltum* - o las especies pueden perecer.”[RN, p. 130].

Sea como fuere, según la historiografía citada, la primera hipótesis transformista de Darwin es saltacionista: las especies surgen “*per saltum*”, se desarrollan y mueren siguiendo la hipótesis de Brocchi más arriba comentada [supra, nota 16, p. 12].

Las reflexiones transformistas del RN continúan y se afianzan en el cuaderno B, donde Darwin aboga decididamente por el transformismo e incorpora la famosa metáfora del árbol de la vida.

El cuaderno B: el árbol de la vida y la segunda hipótesis transformista.

Darwin titula este cuaderno³⁵ B como “Zoonomia” en clara alusión a la obra transformista escrita por su abuelo en la que se defiende la idea de generación gradual de todos los seres desde un filamento vivo [Darwin, E. 1794, I, p. 397]. El libro de Erasmus Darwin (1731-1802), inspirado especialmente en la obra de Buffon y en el idealismo alemán, se fundamenta en la teoría de la recapitulación, que combina las nociones de transformación y de arquetipo. Esta teoría, conocida como la “ley del paralelismo de Meckel-Serres”, se puede resumir en el *dictum* haeckeliano “la ontogenia recapitula la filogenia”, esto es, el desarrollo embriológico del individuo recapitula el de la familia de los organismos.

A pesar de que esta teoría había sido ya desbancada por la teoría epigenetista de Von Baer (1792-1876), defensora de que la ontogenia parte de lo general hacia lo particular, la especulación transformista de Darwin se enmarca aceptando la teoría de la recapitulación [B, p.1], junto con las siguientes leyes de la herencia: (1) las características de los descendientes son mezcla de las características de los progenitores; (2) los híbridos tienden a tomar las características de uno de los progenitores y (3) los cruces consanguíneos y la hibridación tienden a la pérdida de la fertilidad.

Darwin defiende que el origen de la variación en los seres vivos jóvenes se produce “de acuerdo a las circunstancias” [ib., 3], pero las especies permanecen constantes debido a la “hermosa ley de los matrimonios” [ib., 5]. No obstante, no cabe duda de que la imposibilidad de emigración provoca que “los animales en islas separadas deben ser diferentes si se mantiene el tiempo suficiente, aparte de las circunstancias ligeramente diferentes” [ib., 7].

Darwin concluye que la transformación de los organismos es efectiva, por ejemplo en una isla, cuando los individuos que se desplazaron a ella desde el continente formaron grupos que permanecieron aislados. Entonces, al variar las condiciones del medio, la reproducción endogámica entre ellos no sólo evitaría la homogenización por mezcla de caracteres sino que favorecería la transmisión de una adaptación perfecta que al paso del tiempo llevaría a la divergencia de las variedades así formadas [ib., 9-17]. Así pues, Darwin explicita su visión transformista en [B, p. 46]: “la condición de cada animal se debe en parte a la adaptación directa y en parte a la marca hereditaria”³⁶. Ahora bien, como Darwin sigue

³⁵ Los cuadernos los citaremos por su letra y en la bibliografía constan en [de Beer, 1960].

³⁶ apud. [Castrodeza, 1988, p. 159]. Como informa Hodge [2009, p. 45], en el inicio del cuaderno B Darwin

pensando que las especies cumplen la ley de Brocchi [ib., 133], esto implica que las mónadas-filamentos originales- tienen una existencia definida y su destino depende de su situación accidental: cuantos más cambios sufra en su vida con más rapidez perecerá [ib., 22]. Además, con el aislamiento “cada [tipo de] animal sucesivamente se ramifica en distintos tipos de organización” [ib., 19]. Se debe esperar a [B, p. 239] para encontrar un rechazo a la discontinuidad³⁷ y una apuesta firme por el cambio gradual que será una de los compromisos defendidos con obstinada firmeza por Darwin. Como al inicio del cuaderno B, Darwin había propuesto que “los seres organizados representan un árbol ramificado irregularmente” en el que “tantos brotes terminales mueren como los que nacen” [ib., 21], infirió que inscrito en “el coral de la vida” se encuentra la extinción de las especies mediante un proceso de selección natural negativa, que se produce cuando los organismos, las variedades o las especies no están adaptadas perfectamente a las nuevas condiciones que dicta un entorno cambiante [ib., 35, 153]. Como apunta Castrodeza [op.cit.,163-164], este concepto de selección natural negativa o conservadora, que no implica competencia intraespecífica, ni direccionalidad, ni variación ilimitada, era ya conocido por sus coetáneos: los organismos que no están perfectamente adaptados perecen [ib., 90].

En este momento es conveniente resaltar que la hipótesis del antepasado común, que lleva al principio de la unidad de tipo [Darwin, 1859, p. 206], y que se ejemplifica vivamente en la imagen del “árbol de la vida”, es independiente del mecanismo responsable del cambio. Es decir, puede existir un antepasado común sin que las especies actuales evolucionaran por selección natural y puede haber selección natural sin que sea necesario el que todas las especies procedan de unos pocas especies primigenias. No obstante, existirá una relación interna estrecha entre estos dos principios que, junto a otras hipótesis secundarias, completarán la explicación darwinista de la evolución por selección natural [id.]. En ella se esclarecerá no sólo el origen del cambio y la adaptación, sino también el origen de la diversidad biológica y la relación entre los organismos extinguidos y las especies actuales.

En resumen, la segunda hipótesis evolutiva de Darwin deducida del cuaderno de notas B, sostiene que la transmutación gradual de las especies, o sea su transformación, se debe a un efecto combinado de la reproducción endogámica en situación de aislamiento cuando cambia el entorno. Las especies actuales son descendientes con modificaciones de las mónadas primigenias en un proceso de ramificación en el que las especies intermedias desaparecieron mediante un proceso de selección natural negativa entendido de la siguiente manera: aquellos organismos que no se encuentran adaptados perfectamente sucumbirán.

parece seguir la primera parte de la exposición que hace Lyell sobre la teoría de Lamarck en la que se defiende que “las características de los descendientes de padres comunes podrían desviarse indefinidamente de su tipo original” [Lyell, 1832, vol. II, p.23].

³⁷Hasta esta línea del cuaderno B, lo que todavía no se aclara es si el proceso de transformación sigue siendo saltacionista como se propuso en RN [cf. ib.,162].

El argumento maltusiano, la adaptación relativa y la variación aleatoria e independiente de las exigencias del ambiente.

En el cuaderno C, Darwin explora la teoría lamarckiana en la que se sostiene que el uso crea la estructura³⁸

El transformismo de Lamarck tomará diverso protagonismo en la teoría de Darwin pero nunca desaparecerá de escena. Además, Darwin también sigue a Lamarck cuando introduce al ser humano como un ser vivo más, fruto de un proceso transformista [C, pp. 77-78].

Finalmente, el 28 de septiembre de 1838 en el cuaderno D, Darwin utiliza el argumento de Malthus según el cual “la población, si no encuentra obstáculos, aumenta en progresión geométrica. [...] Esto implica que la dificultad de la subsistencia ejerza sobre la fuerza del crecimiento de la población una fuerte y constante presión restrictiva. Esta dificultad tendrá que manifestarse y hacerse cruelmente sentir en un amplio sector de la humanidad” [Malthus, 1993, pp. 53-54]. Dicho de otro modo, la guerra, las hambrunas y las enfermedades reequilibrarán la balanza entre población y recursos. Ahora Darwin emplea esta concepción maltusiana por analogía a la relación entre los seres vivos y sus condiciones de existencia para restablecer el equilibrio y armonía que se observa en la naturaleza³⁹. Como apunta Castrodeza [1988, p. 194], Darwin ha encontrado una causa de transformación todavía limitada. Este principio de selección natural es análogo a una “siega” y, por lo tanto, sigue siendo el principio de selección natural negativo que todavía permite la concepción de una adaptación perfecta cuando la variación es limitada: en un ambiente que no cambia, el PSN negativo cribaría las distintas variedades de una especie ajustando la adaptación al máximo. Con la adaptación perfecta al medio, se detiene el cambio y se establece la estabilidad e inmutabilidad hasta que se produzca una variación del ambiente⁴⁰.

Ahora bien, para que se produzca una transformación indefinida es necesario que Darwin incorpore a su principio de selección natural el concepto de adaptación relativa, donde la variación entre los individuos de una misma especie es tal que siempre algunos individuos están mejor adaptados que otros y, por lo tanto, la lucha por la existencia toma un carácter indefinido. En la nota 137 del cuaderno E, finalizado en julio de 1839, aparecen tímidamente las primeras alusiones al papel que juega el individuo dentro del grupo⁴¹. No obstante parece

³⁸“las circunstancias influyen sobre la forma y organización de los animales” [Lamarck, 1986, p. 167] de tal suerte que “[...] el uso frecuente y sostenido de un órgano lo fortifica [...]” de manera proporcional a su duración y “[...] la Naturaleza lo conserva por la generación en los nuevos individuos con tal de que los cambios sean comunes a los dos sexos, o a los que han producido estos nuevos individuos”[ib., 175].

³⁹“La causa final de toda esta siega -dice Darwin-, debe ser ordenar la estructura adecuada, y adaptarla a los cambios. [...] Se puede decir que hay una fuerza como cien mil cunas que intentan penetrar en cada clase de estructura adaptada en las lagunas de la economía de la naturaleza, o quizá mejor forzando resquicios expulsando a los más débiles.”

⁴⁰Como se ha apuntado más arriba, esta concepción negativa de la selección ya se encuentra presente en otros autores. Los especialistas en la evolución del pensamiento de Darwin creen que en este párrafo, el naturalista inglés alude a la supervivencia de las especies en relación a los cambios físicos del medio y a la lucha entre especies. Más adelante se estudiará el problema de la creatividad de la selección natural en profundidad.

⁴¹“si se produjera una semilla con una ventaja infinitesimal tendría más oportunidades de propagarse” [apud.

que esta aplicación de la lucha por la existencia al individuo no explicita la competencia entre individuos de la misma población, o lo que es igual, “no se considera el medio biológico en todas sus dimensiones posibles a un nivel idéntico al físico” [apud. ib., 208]. De hecho, en los principios que Darwin enuncia en [E, p. 58] sigue siendo el medio físico el responsable principal de la selección.

A la importancia de la adaptación relativa dentro del grupo, se deben añadir otras dos condiciones para completar la teoría de la selección natural: una variación aleatoria y no dirigida por las exigencias del entorno. El azar está presente tanto en la aparición de la variación - cuyo origen le es desconocido⁴²- como en el mecanismo de selección. Darwin atribuye al azar⁴³ el mismo sentido que los naturalistas de su tiempo: la aleatoriedad es una forma de expresar la ignorancia de las causas de las variaciones particulares [op. cit., 131]. En lo que se refiere a la segunda condición, la variación no debe estar condicionada por las exigencias del entorno pues el ambiente podría acabar siendo el director de la evolución como en el modelo lamarckiano.

En conclusión, al finalizar el cuaderno E en 1839, Darwin ha encontrado los tres principios sobre los que construirá su teoría: “(1) los nietos se parecen a sus abuelos, (2) la tendencia a las pequeñas variaciones especialmente con los cambios físicos, (3) gran fertilidad es proporcional al soporte parental” [E, p. 58]. El principio de selección natural basado en el modelo maltusiano no parece tomar en cuenta todas las condiciones de existencia aplicadas al organismo individual como la competencia entre organismos que pertenecen a la misma especie o grupo. Por eso, hasta que Darwin no abandone el concepto de adaptación perfecta e incorpore a la optimización el concepto de adaptación relativa y la ontología del individuo, la transformación sólo tendrá un carácter limitado, supeditado a la variación del ambiente.

Bowler, 1990, p. 102].

⁴²De hecho, Darwin no conocerá nunca cuál es el origen de la variación. El capítulo cinco del “Origen de las Especies” estará dedicado a esta cuestión. En él se barajarán varias hipótesis como la importancia del mecanismo de reproducción, la poca relevancia de las condiciones de vida, como el cambio del clima, los efectos del uso y el desuso, etc. [Darwin, 1859, pp. 131-134].

⁴³Darwin incorporará el azar a su teoría en el cuaderno N -dedicado al ser humano-, en las páginas 42 y 43. En el cuaderno E páginas 111 y 112, Darwin claramente explicita el papel del azar aplicado a la selección cuando afirma: “mi principio de destrucción de todas las semillas menos resistentes y la preservación de las *accidentalmente* resistentes” (cursiva mía, cit. Castrodeza, 1988: 206). El azar también está presente en el origen de la variación. Sobre esta cuestión, es importante recordar que la aleatoriedad de la variación de los organismos domésticos ya era conocida por los criadores, pues aparecía con frecuencia en procesos de selección artificial.

1.2.3. Del Ensayo al Origen: la incorporación al entorno de todas las posibilidades del medio biológico

Como es bien conocido, Darwin escribirá un borrador de su teoría en 1842 y un ensayo provisional en 1844. Es importante destacar que el argumento del *Ensayo* se sustenta en la analogía entre la selección natural y la selección artificial. En efecto, Darwin se interesó desde su viaje en el Beagle por la actividad de los criadores en la mejora de las variedades domésticas y la puso en relación con las silvestres. Este interés aumentó conforme lo hacían sus especulaciones sobre la transmutación, como evidencia la utilización profusa de la analogía en el cuaderno B. Especial importancia tiene el término “picked” (seleccionado) que Darwin utiliza en [C, p. 17] cuando se refiere a que en la naturaleza la progenie no se elige (“picked”) “como hace el hombre cuando forma variedades”. En la página 71 del cuaderno E, queda claro que la analogía relaciona la causa del cambio en las variedades domésticas con la causa del cambio en el mundo natural, pues Darwin afirma que “una hermosa parte de mi teoría implica que las razas domésticas se forman de la misma manera que las especies -pero las últimas mucho más perfectamente e infinitamente más despacio-. No hay animal doméstico que no esté totalmente adaptado a las condiciones externas”. Además, Darwin estructurará el argumento de *El origen de las especies* coincidiendo con el del *Ensayo*: en la primera parte, (1) estudia la variación limitada que presentan los seres orgánicos en estado de domesticación gracias al proceso de selección y cruzamiento al que son sometidos por los criadores, (2) analiza el mismo problema para los seres orgánicos en estado salvaje y compara las razas domésticas con las especies, concluyendo que no existe ningún límite en la naturaleza para la variación debido a la eficiencia de la selección en estado salvaje [Darwin, 1859, p. 251] y (3) expone las dificultades de la teoría en el caso de los instintos y estructuras corporales complejas. En la segunda parte, aplica su teoría a las distintas ramas de la biología: paleontología, biogeografía, morfología, embriología etc.

No obstante y a diferencia del *Origen*, en el *Ensayo* sigue sin aparecer el concepto de adaptación relativa entre individuos de la misma especie que posibilitaría la variación ilimitada⁴⁴.

En conclusión, Darwin no ha completado todavía su teoría: la supervivencia y la muerte sigue siendo la principal forma de entender la selección [ib., 235]. No ha aparecido todavía el individuo darwiniano plenamente en interacción con los otros miembros del mismo grupo y, por lo tanto, la transformación de las especies no es indefinida, puede sufrir estancamientos debido a que está condicionada por un ambiente externo que posibilita la estabilidad.

⁴⁴Darwin supuso que la variación es ilimitada aunque su argumento, puramente negativo, era poco satisfactorio, ya que no especificaba la naturaleza del mecanismo limitador [Darwin, 1859, p. 251]. Todavía, el cambio importante aunque gradual era el de las condiciones externas. Por lo tanto, sigue manteniendo un concepto de adaptación perfecta. El único caso en el que el naturalista inglés mantiene la posibilidad de falta de adaptación es el de aquellos organismos que emigran a una isla, pues el número de estos individuos puede ser enorme, lo que hace indemostrable la imposibilidad de que existan organismos no adaptados totalmente [Castrodeza, op. cit., 210].

1.2.4. La búsqueda de soporte empírico y el camino hacia la adaptación relativa para resolver importantes dificultades

En el mismo año en el que Darwin redactó su *Ensayo*, se produce un importante acontecimiento editorial, la publicación anónima en 1844 de *The Vestiges of Natural History of Creation*. En este libro, escrito por el naturalista aficionado Robert Chambers (1802-1871), se defiende una teoría evolucionista de tipo saltacionista guiada por el entorno mediante causas desconocidas. A pesar de las diferencias evidentes con la selección natural, Chambers demostraba a Darwin que no era descabellado suponer un desarrollo progresivo ininterrumpido. Pero, sobre todo, que para ser tenido en cuenta por los académicos, era imprescindible basar su teoría en una gran evidencia empírica y resolver algunos casos que se resistían a su nuevo marco conceptual.

Desde 1844 hasta 1858, como se acaba de exponer, Darwin buscará soluciones a distintos problemas como: la necesidad de evidencia experimental, cuya fuente principal encontrará parcialmente en la selección artificial; la dificultad de explicar características complejas, como la aparición de los instintos -entre ellos el de los animales sociales y el del ser humano-; y el hecho de que los grupos de organismos con más géneros sean los que presentan también más especies.

A mediados de los cincuenta, se patentiza con toda nitidez la influencia en Darwin de sus lecturas sobre economía política [Hodge, op.cit., pp. 68-69] que inspiran soluciones a los problemas antes mencionados. En especial, la tesis que sostiene Adam Smith (1723-1790) en su libro *Investigación de la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*, según la cual, el interés individual es la fuente que estimula la mutua competencia y, por lo tanto, se convierte en el motor fundamental de la actividad económica, cuyo fruto es la optimización del bienestar público. Como veremos, la ontología del individuo jugará un papel esencial en la explicación por selección natural. Además, Darwin da cuenta de la aparición de los instintos sociales y el denominado principio de divergencia, mediante otra analogía extraída de la economía: la división del trabajo fisiológico. En efecto, Henry Milne Edwards⁴⁵ (1800-1885), mantiene que la especialización de los órganos de un individuo favorece la eficacia en la consecución de las funciones que se deben realizar para su supervivencia del mismo modo que la especialización de la tarea de los obreros en una fábrica posibilita una producción más eficaz. De manera análoga, Darwin sostiene que los organismos que presentan más variabilidad son aquéllos que sobreviven con más probabilidad al igual que aquellos grupos con trabajadores más especializados lograrán asegurarse el alimento con más probabilidad que aquellos grupos cuyos trabajadores están menos especializados.

El naturalista de Down tiene en cuenta estas analogías económicas cuando se enfrenta al estudio que emprende sobre los cirrópodos entre 1846 y 1854. En este trabajo sobre los percebes, se puede encontrar el paso definitivo hacia la variabilidad ilimitada y la

⁴⁵En su artículo de los Anales de las Ciencias Naturales titulado *Considerations sur quelques principes relatifs a la classification naturelle des animaux* (1844).

importancia del individuo dentro del grupo como agente de la selección. En un grupo, cuyos individuos presentan muchas variaciones, es más fácil satisfacer las condiciones mínimas de existencia que en un grupo con individuos muy similares. Es decir, cuando el grupo es más diverso, hay menos competencia entre sus componentes y, por lo tanto, la población de dicho grupo aumentará y se preservarán las variaciones. El 23 de septiembre de 1856, Darwin abogó de forma clara por la lucha intraespecífica: “No sólo los individuos de cada grupo se tratan de desbancar entre sí también todos los grupos con todos sus miembros luchan entre ellos” [apud. op. cit., 259]. La consecuencia de este razonamiento es inmediata, no se puede dar una adaptación perfecta del organismo al medio puesto que siempre existe un desequilibrio ambiental entre el individuo y los otros individuos del grupo. De esta manera, la “lucha” intraespecífica completa las condiciones de existencia, biológicas y físicas, a las que está sometido el individuo y queda fijado lo que se entenderá como entorno darwiniano de Darwin: una agente externo local, cuya acción es continua sobre los organismos. Este último eslabón del razonamiento de Darwin también completa el concepto de individuo en el sentido darwiniano: son organismos que presentan variaciones, se reproducen, pueden transmitir sus características a la descendencia y están sometidos a las condiciones de existencia. La interacción entre el individuo y su entorno local es análoga a la desplegada en la física newtoniana por la fuerza sobre las partículas, por lo que, como veremos, esta causa externa del cambio desplaza la primacía de una concepción finalista de la biología.

1.2.5. El origen de las especies

Como se ha comentado, la hipótesis de Darwin para explicar el cambio y la adaptación de los seres vivos tomará forma definitiva en las sucesivas ediciones de su obra cumbre, *El Origen de las Especies por medio de la Selección Natural o las razas favorecidas en la lucha por la existencia*. En la primera edición de 1859, Darwin incorpora explícitamente a la lucha por la existencia dos aspectos importantes. El primero, ya apuntado anteriormente, es la competencia intraespecífica entre individuos del mismo grupo que implica la adaptación relativa y la posibilidad de transformación indefinida. El naturalista inglés toma a cada individuo como entidad central sometida a la lucha por la existencia y jerarquiza este proceso a diferentes niveles⁴⁶.

El segundo aspecto novedoso y especialmente relevante para el contenido de esta tesis, es la defensa de la selección natural como fuerza creadora. En efecto, Darwin resalta la importancia que tiene en la lucha por la existencia el éxito reproductivo en comparación con la desaparición de los individuos menos aptos, pues, utiliza “ el término Lucha por la Existencia en un sentido amplio y metafórico, incluyendo la dependencia de un ser sobre otro, e incluyendo (lo que es más importante) no sólo la vida del individuo, sino el éxito al dejar progenie” [Darwin, 1859, p. 62]. Pero además, destaca el lento e incesante escrutinio

⁴⁶“como los individuos de la misma especie se encuentran en todos los respectos en la más cercana competencia entre ellos, la lucha será más severa entre ellos; será casi igual de severa entre las variedades de la misma especie, y próxima en severidad entre las especies del mismo género” [Darwin, 1859, p. 467].

del proceso de selección sobre las variaciones individuales, que generación tras generación, y mediante acumulación de “numerosas, sucesiva y ligeras modificaciones”, explica el origen de órganos complejos. La confianza en este lento y efectivo proceso iterativo es tan grande que Darwin afirma taxativamente la “quiebra absoluta de su teoría” en el caso de que se demostrara que algún órgano complejo no pudiera ser explicado por este método [ib.,189].

Darwin era muy consciente de los problemas que permanecían sin resolver y a muchas de las posibles críticas a las que se enfrentaría su teoría. A estas importantes cuestiones dedicará varios capítulos de *El Origen de las Especies*. En las seis ediciones que se publicaron de esta obra desde 1859 a 1871, Darwin ajustará paulatinamente su teoría según se sucedan las opiniones de sus colegas y avancen los conocimientos de su época. Conforme hace frente a estas cuestiones, Darwin aceptará una multiplicidad causal y abandonará cualquier propensión hacia el panadaptacionismo.

En conclusión, en la sexta edición del Origen, además de la selección natural, están presentes tres procesos adaptativos -uso y desuso de las partes, selección sexual, selección familiar (introducida para explicar la evolución altruista de los animales sociales y las castas neutras)- y dos procesos no adaptativos -variación dirigida y variación correlacionada-. Como se ha comentado más arriba, la presencia de estos mecanismos junto a la selección natural está relacionada con el desconocimiento de cómo se transiten los rasgos mediante la herencia. Darwin pensaba que la herencia era de tipo débil. En contraste con la fuerte, la base material de la herencia se puede modificar por el uso y el desuso, por influencia directa del ambiente o por una tendencia interna hacia el progreso [Mayr, 1988, p. 220]. Además, al final de su vida, Darwin incorpora cierto pluralismo ontológico a su teoría de forma muy explícita en la obra que dedicará al origen del ser humano en 1871: tanto los individuos como los grupos se convierten en las posibles unidades de selección [c.f. Darwin, 1872, p. 67].

1.3. Cuestiones metodológicas, epistemológicas y ontológicas del Darwinismo de Darwin

1.3.1. El método de la vera causa y el papel de las analogías en la explicación Darwinista

Darwin acometió con éxito la gran tarea de secularizar el pensamiento biológico. Consiguió su objetivo gracias a la capacidad que demostró para reemplazar la estructura argumental de la teología natural por una teoría completamente naturalista. Concretamente, Darwin sustituyó el argumento del diseño providencial de Paley por un mecanismo ciego, la selección natural, que gracias a su actuación durante inmensos periodos de tiempo podía explicar la transformación de las especies y la adaptación observada de los organismos al medio. Esta incorporación de los seres vivos al esquema naturalista completó la secularización reduccionista emprendida por la física y la química.

Para alcanzar el reconocimiento académico, Darwin sabía que era imprescindible mostrar una metodología escrupulosamente científica:

“En investigaciones científicas se permite inventar cualquier hipótesis, y si se explican una variedad grande de hechos independientes, se eleva al rango de una teoría bien fundamentada. Las ondulaciones del éter e incluso su existencia son hipotéticas; sin embargo, ahora todos admiten la teoría ondulatoria de la luz. El principio de la selección natural puede considerarse como una mera hipótesis, pero se vuelve probable en cierto grado por lo que sabemos positivamente de la variabilidad de los seres orgánicos en un estado de naturaleza, por lo que conocemos positivamente de la lucha por la existencia y la consecuente casi inevitable preservación de las variaciones favorables, y por la formación analógica de las razas domésticas. Ahora bien, esta hipótesis se puede probar, y esto me parece la única forma justa y legítima de considerar toda la cuestión, tratando de explicar si hay una variedad grande de varios tipos de hechos independientes; tales como la sucesión geológica de los seres orgánicos, su distribución en tiempos pasados y actuales y sus afinidades y homologías mutuas” [Darwin, 1868, pp. 8-9]

En esta cita se evidencia que las obras de John W. Herschel y William Whewell sirvieron de inspiración y fundamento para la construcción de la metodología darwinista.

En los *Preliminary discourses*, Herschel defendía el método hipotético-deductivo baconiano y tomaba como guía la filosofía natural newtoniana⁴⁷. Concretamente, Herschel proponía que el método científico se debía iniciar con una serie de generalizaciones inductivas desde los hechos particulares a las leyes universales, o axiomas, los cuales comprendían todo el campo del conocimiento. Una vez alcanzadas estas leyes generales, se emprendía la deducción de casos particulares desconocidos [Herschel, 1973, p.104]. Es evidente que el paradigma del método científico lo constituía la física, en especial la mecánica celeste, pues sus deducciones eran cuantitativas y mostraban una precisión admirable.

Darwin deseaba encontrar la causa externa de la transformación de las especies y de su adaptación al medio al modo de la física de Newton. Esa causa tenía que ser real y no sólo hipotética, o lo que es igual, debería ser posible observarla en la naturaleza independientemente de su papel en la explicación. Además, su actuación sería ininterrumpida. Esto es, conformaría una *vera causa* a la manera de Newton.

Ahora bien, quedaba por salvar un escollo empírico: la falta de evidencia del cambio interespecífico. Bajo un enfoque evolutivo, esta cuestión era la prueba de que la evolución

⁴⁷Como es bien conocido, Isaac Newton (1642-1727) enunció las leyes matemáticas generales del movimiento de los cuerpos en su obra “*Philosophia Naturalis Principia Mathematica*” de 1687. Como se recordará, Newton estableció que las causas de las aceleraciones que sufren los cuerpos son las fuerzas, entre las que destaca la fuerza de gravitación universal.

se producía de manera gradual. En efecto, a pesar de que Darwin modificó su posición en muchos aspectos de su teoría, se mantuvo firme ante el gradualismo del proceso de evolución y en contra del saltacionismo⁴⁸. Esto ocurrió pese a las opiniones en contra⁴⁹ vertidas por evolucionistas importantes como T.H. Huxley, quien no veía la necesidad de seguir con tanta fidelidad el principio de continuidad -“*natura non facit saltum*”-. Tal vez, además de verse apoyado por la analogía entre la naturaleza y la economía política, la adhesión al gradualismo está relacionada con el interés que Darwin muestra en secularizar la explicación en historia natural, pues la existencia de brechas en el continuo dejaría un resquicio para la intervención sobrenatural y la ruptura de la causalidad férrea inscrita en las leyes de la naturaleza [Darwin, 1859:194] con la consecuente pérdida de inteligibilidad de la teoría [ib., 471]. Como dice Mayr [1988, p. 202], si Darwin deseaba explicar la adaptación sólo podía seguir dos alternativas: una intervención divina puntual a la manera de la teología natural - incluido el caso que adelantábamos de que las leyes naturales fueran fenómenos inexplicables como los errores de las máquinas de Babbage -, o la transformación paulatina mediante una secuencia inapreciable de pequeños e innumerables pasos también adaptativos. Por eso, Darwin suscribe el actualismo y el uniformismo de Lyell: las mismas causas que operan en el mundo natural observable y el efecto acumulativo del transcurrir lento e inexorable del tiempo explicaría la imposibilidad de la observación del cambio en tiempo real, la sucesión de especies en el registro fósil y la adaptación de los seres vivos. Con todo, ¿cómo demostrar que la causa era la selección natural sobre los individuos?

Como acabamos de decir, si no podía acceder a la causa inmediata y deseaba cumplir con las exigencias de un método escrupulosamente científico, sólo le quedaba seguir alguno de los dos caminos⁵⁰ trazados por Herschel para llegar de la experiencia a la ley natural: (1) aplicar análisis inductivos a un número grande de fenómenos aislados para encontrar una ley general deducida de las correlaciones o (2) formular hipótesis que llevarán a causas verdaderas, o sea “a causas que se reconoce poseen una existencia real en la naturaleza, y

⁴⁸Una visión esencialista del concepto de especie encaja a la perfección con el saltacionismo: las especies son clases naturales cuyas propiedades, tomadas en su totalidad, son las condiciones necesarias y suficientes para considerar a cualquier entidad dentro de un grupo. Además, cualquier variación singular grande de carácter morfológico podría convertirse en la fuerza creativa principal. Por eso, Darwin afirma que este tipo de variaciones (*sports*) son extremadamente raras en la naturaleza [1859, p. 10]. Es más, si las desviaciones estructurales son grandes, como en el caso de los “monstruos”, no serán en general adaptativas y se eliminarán mediante selección natural.

⁴⁹Entre las críticas al gradualismo se encuentra la famosa tesis de St.George Jackson Mivart (1827-1900), quien planteaba la existencia de una tendencia interna de las especies que guiaba el cambio a saltos. Mivart pensaba que la selección natural era incapaz de explicar las primeras fases de las estructuras útiles debido a que las pequeñas variaciones se muestran en todas direcciones y, por lo tanto, podrían neutralizarse mutuamente haciendo imposible que ningún rasgo quedara fijado por la selección natural [Darwin, 1872, p. 181].

⁵⁰En el “Ensayo” de 1844 y en el “Origen”, Darwin aplica estas metodologías no sólo en el caso de la selección natural, sino también el de la selección sexual, etc. Su método se hace explícito desde la redacción de los libros de notas: “La línea que a menudo se sigue en mis teorías consiste en establecer por inducción una cierta probabilidad para un punto y a continuación aplicarlo a otras partes como hipótesis y ver si las resuelve o no lo utilizó en todas las áreas de la biología [Dobzhansky et al., 1980, p. 483].

no meras hipótesis o fantasías de la mente” [op.cit., 144].

No obstante, como sugiere Ruse [1983, p. 84], la cuestión reside en averiguar cómo se puede saber que una causa es una *vera causa*. Herschel tenía la respuesta:

“Aquí, entonces, vemos la gran importancia de poseer un repertorio de ejemplos análogos o fenómenos que se clasifican con los considerados, [...] si la analogía de dos fenómenos es muy cercana y sorprendente, mientras, al mismo tiempo la causa de una es muy obvia, sería apenas posible negarse a admitir la acción de una causa análoga en el otro, aunque no sea obvia en sí misma” [ib.,149].

Este texto aclara la razón por la que Darwin pensó que le serviría metodológicamente el establecer una analogía con otra causa cuya actuación se pudiera observar. La selección artificial representa una parte importante del soporte experimental de la selección natural. Además, Darwin respaldó su defensa de la selección natural como causa verdadera o fuerza externa de la transformación en otras metáforas mecánicas como el efecto de las cuñas, ya aludido, o el de los muelles y en analogías extraídas de la economía política [Depew y Weber, 1995, p.125].

En este punto parece importante resaltar el paralelismo metodológico entre el uso que Darwin hace de la analogía y el llevado a cabo por el Darwinismo Cuántico: ambos pretenden convencer de la plausibilidad de un modelo de cambio cuando no hay un acceso directo empírico al fenómeno. En el caso del modelo ideado por Zurek, se pretende dar cuenta de la transición entre el mundo cuántico y el clásico reflejado en los datos estadísticos ya que, como veremos en la segunda parte de este trabajo, no es posible observar directamente la caída del entrelazamiento y la superposición de los estados cuánticos.

La analogía entre la selección y la fuerza aporta también implicaciones de tipo ontológico fundamentales para que se pueda dar un cambio ilimitado. En efecto, como se observó más arriba, la influencia de la economía política sobre el pensamiento de Darwin pudo ser el motivo de la transición en su teoría desde una ontología de la especie a una del individuo. En el momento que los individuos se convierten en la ontología primaria, Darwin no tiene más remedio que optar de manera pragmática por concepciones nominalistas⁵¹. La analogía con la mecánica newtoniana favorecería este paso, ya que, para Newton, el constituyente último de los cuerpos, su ontología fundamental, son las partículas [Newton, 1977, p.325] y la fuerza de la gravedad entre ellas conforma la esfericidad de los cuerpos celestes al igual que la interacción entre los individuos de un mismo grupo en el ambiente conforma la especie. Así pues, las fuerzas externas actuando sobre el individuo producen el cambio en el grupo. Es decir, las leyes naturales, tanto para la física como para la biología, están implicadas en la configuración del mundo.

Otra contribución del newtonianismo a la ontología darwinista es el abandono de la teleología natural al uso [op.cit., 127-133]. Todavía en los libros de notas, Darwin seguía

⁵¹[Darwin, op.cit., 44-51], según Depew y Weber [ib., 27].

apostando por cierto finalismo⁵². Pero, una vez que se consideran las variaciones entre los individuos, la selección natural es un mecanismo ciego y, como afirma Burian: “la adaptabilidad relativa remplazó perfectamente la adaptabilidad producida por una causa final” [apud. ib.,133]. Por consiguiente, el mecanicismo de tipo newtoniano relega la explicación funcional a un puro método de indagación que es el inverso al utilizado por los ingenieros: si conocemos las funciones -el para qué-, es posible aventurar distintas hipótesis, que serán debidamente exploradas y falsadas, para encontrar el cómo.

Esto se consigue fácilmente si las leyes generales expresaban el diseño dado del mundo como opinaba Herschel⁵³. Su conocimiento era accesible mediante el análisis científico de sus componentes al igual que un mecanismo de relojería. En contraposición a la estabilidad ontológica propugnada por Herschel, Whewell sostenía que el Creador participaba continuamente en su obra de tal manera que parte del diseño podía quedar oculto al entendimiento. Este filósofo de la ciencia mantenía que las causas verdaderas podían ser completamente inaccesibles a la observación directa. Es más, pensaba que el método analógico de Herschel, para deducir causas verdaderas de otras análogas, podía no ser eficaz cuando estas últimas tampoco fueran accesibles a la observación. En pocas palabras, Herschel no había proporcionado una estrategia para encontrar causas previamente desconocidas de las que no se pudiera encontrar un análogo observacional. Si las causas no eran accesibles, para poder encontrar una *vera causa*, Whewell planteaba el método de la “confluencia inductiva”: las distintas disciplinas o áreas científicas podían confluir en un mismo principio, la misma causa, del mismo modo que los movimientos celestes y terrestres se podían deducir de los mismos principios de la mecánica. Esta causa encontrada por confluencia sería la causa verdadera [Ruse, 1983, p. 85]. Whewell articula el descubrimiento científico componiendo los hechos elementales encontrados en la naturaleza con las ideas o principios racionales que relacionan dichos hechos. Encuentra un caso ejemplar en la teoría ondulatoria de la luz [Darwin, 1868, cap. XV]: los hechos son los resultados de los experimentos de interferencias de la luz en un dispositivo de doble rendija de Thomas Young (1773-1829) y los experimentos de difracción y aberración de la luz de Fresnel (1788-1827). La coligación o confluencia de hechos se conseguiría mediante la idea de onda propagándose en el éter luminoso, que se constituía como causa verdadera de la formación de los patrones de interferencia, difracción y aberración de la luz, a pesar de que fuera un principio completamente inaccesible a la observación directa⁵⁴. De forma análoga, Darwin sugiere que los distintos problemas que presentan las diversas teorías relacionadas

⁵²“la causa final de todo este apalancamiento tiene que ser clasificar la estructura y adaptarla al ambiente” [D:135 e].

⁵³C.f. Martínez [1988, pp. 301-318].

⁵⁴A primera vista, parecería sencillo encontrar analogías mecánicas, como la generación de ondas en un tanque de agua, que pudieran extender las causas observacionales de la mecánica a los fenómenos luminosos. Parece que los intentos de Herschel por satisfacer dicha analogía fueron infructuosos [ib. op.cit., 86]. Pensemos en la dificultad de encontrar analogías mecánicas en el caso de la aberración luminosa, pues Fresnel proponía que el éter permeaba totalmente la materia.

con los seres vivos apuntan a la selección natural como causa verdadera, esto es, la hipótesis que unifica las soluciones a los grandes enigmas de la historia natural.

1.3.2. La estructura del argumento de Darwin

Así pues, Darwin formula un “largo argumento” estructurado en torno a las dos metodologías más aceptadas en su época y repleto de evidencias observacionales - o, en su defecto, analogías plausibles - para satisfacer los estándares de calidad científicos más exigentes de su época. Cuando se expone un argumento, se trata de justificar una tesis o sencillamente persuadir a otros de alguna cuestión mediante una concatenación de razonamientos. Los objetivos perseguidos en la defensa de una afirmación condicionan la estructura del argumento. En otros términos, la construcción de un argumento desde las premisas a las conclusiones, se encuentra supeditada a los fines. Darwin plantea dos ideas principales, la unidad de tipo y las condiciones de existencia, para explicar cuatro cuestiones diferentes: (1) la transformación de las especies, (2) su origen común, (3) el origen natural y no accidental de la diversidad y (4) el origen natural y no accidental de la maravillosa adaptación que mostraban los organismos con su entorno. La unidad de tipo y la selección natural son dos principios independientes aunque se presentan a veces relacionados para dotar de poder explicativo a la teoría. Esto se debe a que Darwin construye la “ley de las condiciones de existencia” (TSN) junto a la hipótesis del antepasado común de forma que puedan satisfacer los resultados experimentales y las necesidades epistémicas de todas las disciplinas pertenecientes al ámbito de la historia natural -la sistemática, la morfología, la embriología, la paleontología, la herencia, la biogeografía, etc.-. Es decir, se debe cumplir la necesidad metodológica de encontrar la causa verdadera por confluencia. Por lo tanto, el poder unificador de la TSN que explicitara la cita de Theodosius Dobzhansky, “Nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución” [1973, p. 1], es una consecuencia de la construcción de la teoría.

En *El origen de las especies*, Darwin se dispone a desvelar los mecanismos naturales responsables de los cuatro objetivos expuestos. Si éstos fueran independientes, Darwin hubiera podido construir un argumento para cada uno basado en su causa correspondiente. Desgraciadamente, como hemos visto, están íntimamente relacionados entre sí. No obstante, Darwin deja clara la primacía de la selección natural entre las posibles causas, puesto que “la ley de las Condiciones de Existencia es la ley superior; ya que incluye, a través de la herencia de adaptaciones anteriores, la de Unidad de Tipo.” [Darwin, op.cit., 206] .

Considerando las cuestiones metodológicas aludidas, el largo argumento de *El Origen de las especies* muestra la siguiente estructura:

1. En los capítulos del 1 al 4 (C1-C4), Darwin se dedica a construir el argumento analógico para demostrar que el proceso de selección natural es una causa verdadera. En el capítulo primero (C1), presenta las condiciones de variación de los organismos en estado doméstico: su origen, el papel de la herencia y los efectos de de la cría

realizada por el ser humano, que puede llevar a cabo una selección consciente (metódica), pero que también es capaz de introducir cierta aleatoriedad al seleccionar individuos de forma inconsciente, ya sea por falta de pericia o por otras causas.

En el segundo (C2), estudia la variabilidad bajo las condiciones naturales: expone la importancia de las diferencias individuales y la dificultad para diferenciar entre variedades y especies en el mundo natural.

En el tercer capítulo (C3), una vez establecida la importancia de la variación individual heredable, Darwin establece el mecanismo maltusiano de la lucha por la existencia aplicado a las relaciones del individuo con el medio. Darwin informa del significado metafórico que incorpora, como ya se ha explicado, “la dependencia de unos seres en otros, e incluyendo -lo que es más importante- no solamente la vida del individuo, sino el éxito en dejar descendencia”[Darwin, 1859, p. 62]. Con otras palabras, individuos diferentes poseen rasgos distintos que aportan: (1) distintas probabilidades de supervivencia - es decir, muestran desigual viabilidad- y (2) diversas probabilidades de dejar descendientes - o sea, distintos grados de fertilidad-.

En el cuarto capítulo (C4), extiende la analogía de la selección artificial a la selección natural que es más constante y eficaz, pues no sólo atiende a las variaciones externas de los individuos sino también a las internas [ib., 80-86]. Darwin deja claro que el principio de selección natural no es sólo negativo -la criba de los menos aptos-. Es también importante el éxito en dejar descendientes que por efecto de acumulación convierte al proceso iterativo de la selección natural en un mecanismo creativo⁵⁵. Esta cuestión se tratará con más profundidad más adelante pues es muy relevante para la conclusión de nuestra tesis.

Además, Darwin también expone el cometido de la selección sexual, la importancia de cuestiones como cruzamientos, el aislamiento y el número de individuos en el grupo. Estos mecanismos, junto a la SN, aumentan el poder explicativo de la su teoría [ib., 127-129].

A esta altura del libro, ya se han satisfecho las condiciones metodológicas requeridas por Herschel: mediante una analogía con la selección artificial, se ha encontrado una *vera causa* que explica la transformación gradual, la adaptación, la extinción y la divergencia de las especies. Ahora, Darwin se dispone a afrontar las dificultades de que la hipótesis sea tenida por causa verdadera.

2. En los capítulos del seis al nueve (C6-C9), Darwin expone las dificultades de la teoría.

Si alguien dudara de que el argumento analógico con la selección artificial pudiera ser concluyente a la hora de establecer que la selección natural es una *vera causa*, entonces Darwin se asegura de proporcionar al escéptico una causa verdadera mediante la “confluencia inductiva” de Whewell. Pero antes, es especialmente importante abordar

⁵⁵[ib., 61, 79, 81, 95, 127, 170, 233, 320, 433 y 467].

el intrincado problema de la relación entre reproducción, variación y herencia y que estos resultados sean coherentes con las distintas disciplinas o áreas científicas que deben confluir en un mismo principio, la misma causa.

3. En los capítulos cinco (C5) y trece (C13), aborda la naturaleza de la variación y la herencia, que presenta relaciones con el crecimiento y la reproducción.

En el capítulo (C5), resalta que a pesar de su defensa de la aleatoriedad de las variaciones, esto únicamente significa el desconocimiento de las causas particulares de la variación. En principio, Darwin pensaba que toda la herencia era de tipo débil, por esta razón era posible que la variación tuviera un origen doble: la naturaleza del organismo es la más importante y se complementa con la presión debida a las condiciones de existencia, entre las que se incluye la propia selección natural [ib.,133]. Parece así que es relevante el uso y el desuso, pues en el caso de las variedades domésticas se demuestra que se puede heredar [ib.,134]. Además, los órganos homólogos tienden a variar de la misma forma y a ser coherentes [ib.,168]

En el capítulo trece (C13), Darwin da cuenta del buen ajuste entre su teoría y tres disciplinas íntimamente relacionadas con la variación y la herencia como son: la sistemática, la morfología y la embriología⁵⁶.

4. En los capítulos diez, once y doce, Darwin trata de los casos donde se evidencia el poder de la selección natural para explicar los hallazgos paleontológicos (C10) y la distribución geográfica de las especies o biogeografía (C11 y C12).

Una vez incorporadas todas las disciplinas al método de la confluencia, resume en el capítulo 14 el largo argumento.

1.3.3. La Reconstrucción del Argumento de Darwin.

Darwin no describe formalmente la teoría de la selección natural. Como se ha señalado al explicar la metodología darwinista, simplemente propone una hipótesis muy probable, la *vera causa*, que se sigue en el caso de que tengan lugar algunos hechos observacionales y sobre ellos opere cierto mecanismo. En el lenguaje actual de la filosofía de la ciencia sería una ley tipo *ceteris paribus*.

⁵⁶En relación a la sistemática, afirma la importancia de la genealogía, esto es, de la unidad de descendencia frente al argumento teleológico para explicar la clasificación. Esta cuestión se extiende al caso de la morfología, donde pone de acuerdo su teoría con las ideas de Richard Owen y, por lo tanto, la descendencia con modificaciones explicaría que se encuentre el mismo patrón en órganos homólogos. Por último, Darwin adecua su hipótesis a la teoría embriológica de Karl Ernst von Baer (1792-1876) que, como se recordará, se puede resumir en dos puntos: (1) el *dictum*, “la ontogenia nunca recapitula la filogenia” y (2) la divergencia, los grupos de organismos con más géneros son los que presentan más especies y más variedades. Esta teoría embriológica influyó en la taxonomía pues promovió una nueva forma de entender la clasificación. Teniendo estas consideraciones en cuenta, en el caso de la embriología, la teoría explicaría por qué tienden a parecerse los embriones entre ellos más que los adultos, cuál es la razón de la existencia de órganos rudimentarios y, sobre todo, cuál es el mecanismo que favorece el principio de divergencia.

Aunque el naturalista inglés resume retóricamente su razonamiento en varios pasajes del Origen, por ejemplo en [ib., 61; 80-81; 489-490], estos sumarios no son siempre equivalentes. Darwin plantea su argumento apoyándolo siempre en casos particulares. Sin embargo, intenta construir un razonamiento deductivo, a saber, desde las premisas o hechos a la conclusión⁵⁷.

Por eso parece conveniente presentar la reconstrucción del argumento vestida con las propias palabras de Darwin:

1. Los individuos dentro de las especies varían:

“El resultado de las diversas leyes de la variación, bastante desconocidas o vagamente vistas, es infinitamente complejo y diversificado. [...] es realmente sorprendente observar los interminables puntos de estructura y constitución en los que las variedades y sub-variedades difieren ligeramente entre sí. Toda la organización parece haberse vuelto plástica y tiende a apartarse en cierto grado de la del tipo parental” [ib.,12].

2. La variación es a veces heredable:

“Cualquier variación que no se hereda no es importante para nosotros. Pero el número y la diversidad de las desviaciones heredables de la estructura, tanto de las ligeras como las de considerable importancia fisiológica, es interminable” [íd.].

3. La definición de la Lucha por la Existencia y los hechos que fundamentan dicho principio:

“Utilizo el término Lucha por la Existencia en un sentido amplio y metafórico, incluyendo la dependencia de un ser sobre otro, e incluyendo (lo que es más importante) no sólo la vida del individuo, sino el éxito al dejar a la progenie” [ib., 62].

“Una lucha por la existencia se debe inevitablemente a la alta tasa a la que todos los seres orgánicos tienden a aumentar. [...] Por lo tanto, a medida que se producen más individuos de los que pueden sobrevivir, debe haber en cada caso una lucha por la existencia, ya sea un individuo con otro de la misma especie, o con individuos de especies distintas, o con las condiciones físicas de vida” [ib., 63].

⁵⁷“Estas leyes, tomadas en el sentido más amplio, son el Crecimiento con la Reproducción; la Herencia que está casi implicada por la reproducción; la Variabilidad derivada de la acción indirecta y directa de las condiciones externas de vida, y del uso y desuso; Una Proporción de Aumento tan elevada como para conducir a una Lucha por la Vida, y como consecuencia de la Selección Natural, que conlleva la Divergencia del Carácter y la Extinción de las formas menos mejoradas. Así, de la guerra de la naturaleza, del hambre y de la muerte, el objeto más exaltado que somos capaces de concebir, o sea, la producción de los animales superiores, se sigue directamente. [...]” [ib., 489-490].

4. Conclusión 1: La definición de Selección Natural.

“¿Puede entonces parecer improbable, viendo que variaciones útiles para el hombre han ocurrido indudablemente, que ocurran otras variaciones útiles de algún modo para cada ser en la grande y compleja batalla de la vida durante el curso de miles de generaciones? Si tal cosa ocurre ¿podemos dudar (recordando que nacen muchos más individuos de los que puedan sobrevivir) que quienes tienen ventaja, por ligera que sea, sobre otros tendrían más probabilidades de sobrevivir y procrear su especie?

Por otra parte, podemos estar seguros de que toda variación perjudicial en mínimo grado será rigurosamente destruida. A esta conservación de las variaciones favorables y extinción de las perjudiciales la llamo Selección Natural” [ib., 80-81].

A esta definición de Selección Natural, Darwin también la denomina Principio de Selección Natural.

5. Conclusión 2: Los efectos acumulativos explican la adaptación y la transformación de las especies.

“La expresión de las condiciones de existencia, tan a menudo insistida por el ilustre Cuvier, es plenamente aceptada por el principio de la selección natural. La selección natural actúa adaptando las diferentes partes de cada ser a sus condiciones orgánicas e inorgánicas de vida; o adaptándolas durante períodos de tiempo muy largos [...]” [ib., 206] “[...] Las especies han cambiado y siguen cambiando lentamente por la preservación y acumulación de sucesivas y ligeras variaciones favorables” [ib., 480].

Las reconstrucciones del argumento de Darwin y la explicación Darwinista procedente del Origen a veces se han mostrado como un argumento formal lógico deductivo [Williams, 1970, pp.343-385]. No obstante es preferible seguir el esquema argumental propuesto por Mayr⁵⁸ con ligeras modificaciones y anotaciones lógicas, pues no sólo es uno de los más divulgados y pedagógicos sino que se encuentra incardinado en la tradición de autores relevantes en la historia darwinista⁵⁹.

⁵⁸Mayr [1988, p. 219; 1991, p. 72; 2001, p. 116].

⁵⁹Se puede encontrar versiones anteriores en Weissmann [1909], Julian Huxley [1942], etc.

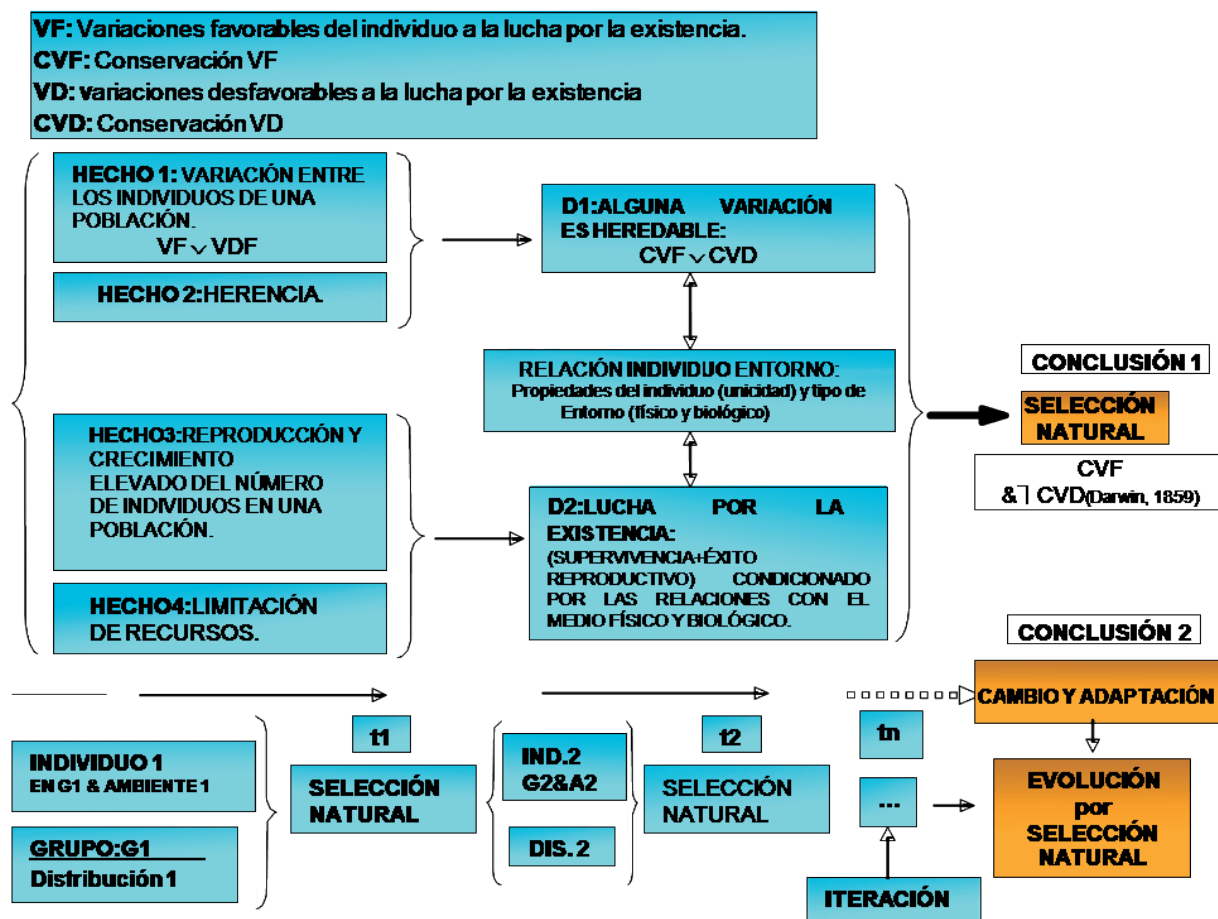


Figura 1.1: Síntesis del argumento de Darwin en dos procesos distintos. En la parte superior el principio de selección natural (PSN) de naturaleza sincrónica. En la parte inferior, el proceso diacrónico iterativo que junto al primero constituyen la teoría de la selección natural (TSN).

1.4. La Explicación Darwinista de Darwin

Una vez presentada la exposición histórica, en este apartado se analizará la explicación darwinista mediante un estilo más argumentativo.

Una de las ventajas de la reconstrucción que se presenta en este trabajo es su claridad con respecto al tipo de explicación que aporta el argumento de Darwin. En primer lugar, a pesar de que las premisas no funcionan como axiomas, el argumento muestra cierto carácter deductivo, pues es un proceso que parte de unas pocas premisas y lleva a una conclusión, lo que demuestra la relación orgánica que mantienen las distintas proposiciones entre sí. No obstante, como es bien sabido, el proceso de deducción no tiene por qué llevar a una conclusión verdadera. Bastaría con saber si esta demostración aporta garantías suficientes para llegar de las premisas a la conclusión. Esto significa que los hechos de los que parte el razonamiento pueden ser más o menos evidentes o estar apoyados por generalizaciones inductivas. En este caso, estamos ante un problema empírico observacional y, en gran medida, éste se salva gracias a la analogía establecida con la selección artificial⁶⁰.

⁶⁰En este sentido, la crítica a la parte empírica de la teoría intentó invalidar la analogía afirmando que la

En segundo lugar, esta división del argumento diferencia dos tipos de *explananda* que separan dos tipos de conclusiones: (1) como se ha advertido ya, la primera, es ejemplo de explicación causal de tipo *ceteris paribus*, esto es, si se cumplen ciertas condiciones entonces se puede establecer una causa verdadera fundamentada en analogías antedichas; y (2) la segunda conclusión es fruto de una iteración de procesos causales que convierte la explicación de la evolución por selección natural en histórica. Con otras palabras, para que, según Darwin, se produzca la evolución por selección natural se necesita que al PSN le incorporemos un principio de temporalidad en las condiciones locales del entorno de manera que se produzca el elemento acumulativo necesario para explicar la adaptación que se observa en la actualidad. En este punto, se debe evidenciar la diferencia entre el poder de la selección en un solo paso y el gran poder que atribuye Darwin a la acumulación de un gran número de pequeños pasos [Darwin. 1859, p. 471]. Así pues, las variaciones pequeñas, la selección mantenida durante generaciones y la iteración producen la adaptación de los organismos además de la complejidad de ciertos órganos. También es importante advertir que debe existir un equilibrio entre los poderes de la variación y la selección: si se intensifica demasiado la selección, entonces se puede poner en peligro la variación y una variación enorme puede borrar los efectos de la selección [Sterelny y Griffiths, 1999, pp. 35-38].

A tenor de lo expuesto se puede concluir que la teoría de la evolución por selección natural (TSN) es histórica o diacrónica y su cometido es narrar la sucesión de cambios - algunos de los cuales podrían encontrarse en el registro fósil - que llevaron a la adaptación y armonía que muestran los seres vivos en la actualidad. Para llegar a esta conclusión, la TSN utiliza iterativamente el principio de selección natural (PSN), que es de tipo sincrónico. Éste daría cuenta de la supervivencia y reproducción diferencial debidas a las interacciones entre individuo y entorno. Los *explananda* de la TSN explicarían⁶¹: (1) el origen de rasgos en una población, además de su distribución y estabilidad y (2) el rasgo particular que posee actualmente un individuo. Estos dos *explananda* se apoyarían en el principio de selección natural (PSN) que explicaría (3) la dinámica de las frecuencias o el cambio de los rasgos en una población entre dos generaciones, (4) la composición de una población en un punto particular del tiempo y (5) la supervivencia de un individuo, su éxito reproductivo y su existencia.

En tercer y último lugar, en la literatura sobre la evolución y, especialmente en la época de Darwin, encontramos tres conceptos diferentes relacionados con la expresión “selección natural” que explican cuestiones muy distintas. Junto a los dos conceptos anteriormente expuestos -PSN y TSN- destaca la noción de “lucha por la existencia”. Ésta sería un tipo de “selección natural” en el sentido estrecho entendido como mera criba. En efecto, si no se tiene en cuenta la variación y la herencia, esta selección se convierte en un tamiz que,

interacción del ser humano con los organismos alteraba el estatus empírico de éstos. Por otro lado, incluso se podría poner en cuestión la deducción uno (D1), pues podría darse el caso de que las variaciones no se heredaran y sólo los caracteres neutros compartidos por los miembros del grupo pasaran de los progenitores a los descendientes.

⁶¹ Siguiendo a Ginnobili [2010, p. 81].

aplicado secuencialmente en el tiempo, estabiliza los rasgos de una población y, por tanto, no puede explicar el cambio. Como hemos apuntado, este sentido negativo de la selección natural era ampliamente conocido y aceptado por los naturalistas coetáneos a Darwin⁶². El concepto de selección como filtro se puede encontrar incluso en la *Natural Theology* de Paley cuando afirma que las variedades se abrieron paso a las condiciones de existencia salvo aquéllas que perecieron debido a la presencia en ellas de algún tipo de malformación⁶³.

No obstante, como defiende Darwin en su libro *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación*, la selección dirige en cierta manera el cambio pues si la variación es aleatoria la selección sería la responsable de la adaptación y su papel podría considerarse análogo al trabajo de un arquitecto⁶⁴. Además, como vimos, el principio de adaptación relativa supone que de facto existe una variabilidad ilimitada, no hay individuo que sea igual a otro, por lo que no es necesaria la aparición de variación nueva sobre la que actuar para que se produzca un cambio continuo y la evolución nunca se detenga. Por último, si admitimos con Darwin [supra, p. 31] que el principio de selección incluye el de unidad de tipo, entonces la selección natural es la responsable última de la especiación y la diversidad.

De la misma forma, según Beatty (2016), Alfred Russel Wallace defendió el carácter positivo de la selección natural cuando aclaró que la variación se encuentra “Siempre fluctuando sobre una condición media hasta que se hace avanzar en una dirección dada por «selección» natural o artificial, que es la base simple para la modificación indefinida de las formas de vida” [apud. ib., 668]. Dicho de otra forma, la selección en una dirección particular incrementaría la probabilidad de generación de variación a lo largo de la misma trayectoria. También lo creyó el neodarwinista Agust Weismann (1834-1914), al proponer la existencia de un doble sentido para la variación: uno accidental para los individuos y otro dirigido gracias a la acción de la selección natural durante generaciones para la media y el alcance o amplitud a través de la sucesión de generaciones [ib., 669]. En este segundo caso, Weismann incluso acuñó el término “mecanismo interno” para destacar la existencia de un motor director intrínseco de variación en los individuos derivado de la selección natural sobre el plasma germinal [ib., 670].

El debate sobre la capacidad creativa de la selección natural tomó otro cariz una vez que se redescubrieron las leyes mendelianas de la herencia. Algunos autores consideraron que la variación era el mecanismo director de la evolución y el único que explicaba el origen de nuevas estructuras. Por ejemplo, Hugo de Vries (1848-1935), amigo de Darwin y uno de los “redescubridores del mendelismo”⁶⁵, pensaba que el proceso de selección natural darwiniano era puramente negativo, puesto que “para ser seleccionado, primero se debe haber producido un cambio”, por lo tanto, “la selección natural es sólo un tamiz y no una fuerza de la naturaleza, no una causa directa de mejora [...] no tiene nada que ver con los

⁶²Cf. [Gould, 2004, p. 163] y [Castrodeza, 1988, p.163].

⁶³Cf. [Paley, 1803, p.70-71] apud. [Gould, 2004, p.164].

⁶⁴[Darwin, 1868, vol.2, pp. 248-249] apud. [Beatty, 2016. pp.664-665].

⁶⁵Para una visión crítica sobre la tradicional historia del codescubrimiento de la obra de Mendel consultar [Lorenzano, 2008].

pasos singulares de la evolución. Sólo una vez que se ha dado el paso (la mutación), el tamiz actúa, eliminando los inadaptados.”⁶⁶. No obstante, también admitía que “la variación en una dirección se puede incrementar mediante la selección en esa dirección”[apud, ib., 672]. Es decir, la selección desplazaría la variación media a la vez que cambiaría la distribución de la variación. De una manera más explícita, en sus conferencias tituladas *Evolución y Mendelismo* (1921), el genetista T.H. Morgan aclara que la selección natural como proceso creativo puede ser entendida de dos maneras: (1) la selección de un individuo de una clase dada determina la presencia de variaciones en la misma dirección y (2) la selección de un individuo de una clase dada mediante multiplicación hace más probable que se obtenga un resultado final⁶⁷. Independientemente de la existencia de esta doble vía para entender el proceso evolutivo como creativo, tanto de Vries como Morgan abogaban por un estancamiento del cambio en ausencia de nueva variación (mutación), como sucedía en la selección artificial [ib., 673].

En los debates sobre la evolución, son recurrentes estas críticas a la incapacidad que mostraría la teoría de la selección natural para crear algo nuevo. En este sentido, el doble argumento expuesto en este trabajo puede aclarar algunos puntos oscuros de este debate. Se suele atribuir a la selección natural la explicación de la distribución de un conjunto de rasgos variables en un grupo, pero se le niega la capacidad de explicar por qué ciertos rasgos están presentes o por qué existen individuos de cierto tipo. La selección (PSN) no causa la aparición de una nueva variante en un solo paso. Como ya se mencionó, la acción acumulativa de la selección natural (TSN) - esto es, la variación y la selección actuando de forma cíclica - aumentan la probabilidad de llegar a la compleja estructura de un ojo mediante pequeños y graduales eventos adaptativos. Bajo este punto de vista⁶⁸, la variación puede producir rasgos nuevos pero sin ningún orden y la selección sola no crea nada nuevo pero logra que ciertas características se fijen en el tiempo. Por lo tanto, el PSN operando mediante un proceso de retroalimentación iterativo (TSN), que ajusta de forma relativa cierta variación disponible en cada momento a las condiciones del medio, logran explicar la adaptación de los organismos a las condiciones de vida y la existencia de individuos con ciertos rasgos y órganos particulares.

Con una orientación similar, Stephen Jay Gould (1941-2002) argumenta que la contribución más importante de Darwin al pensamiento evolutivo es sin duda el “convencimiento del poder creativo de la selección natural” [Gould, 2004, p. 166]. En efecto, el famoso paleontólogo americano mantiene que se deben asumir tres requerimientos mutuamente relacionados para obtener un proceso de selección natural creativo, a saber: (1) la tasa de variación debe ser pequeña en amplitud, independiente de la dirección del cambio evolutivo y copiosa pero no en exceso, para que no se convierta ésta en agente del

⁶⁶[apud. Godfrey-Smith, 2014, p. 38].

⁶⁷Morgan toma partido por esta segunda variante pues no sabe cómo se podría dar la primera aunque deja abierta la posibilidad [Morgan, 1921, p. 168].

⁶⁸Ver [Godfrey-Smith, 2014, cap. 3].

cambio; (2) la tasa y continuidad de cambio necesariamente será gradual, o sea, muestra una secuencia histórica continua, imperceptible⁶⁹, lenta y uniforme aunque no necesariamente constante; y (3) la conjunción que imponen las condiciones de existencia, la variación ante dicha y el ajuste gradual construyen la adaptación. Ésta representa el núcleo central del proceso de conversión de la información ambiental en cambios fisiológicos [ib., 181-189] y, en consecuencia, se puede considerar que el ambiente desempeña el papel de agente activo que guía el proceso evolutivo.

Al igual que Gould [2004], John Beatty (2016) afirma que la creatividad del proceso de selección natural es la componente esencial de lo que la tradición historiográfica denomina “darwinismo”. Este autor sostiene con argumentos renovados que la mejor manera de apreciar el carácter creativo de la selección requiere abandonar la idea tradicional y ampliamente aceptada que reduce la selección natural (PSN) a un proceso de dos pasos: variación y selección. Los dos argumentos que sostienen la tesis sobre la creatividad de la selección natural son: (1) realmente la selección no sería el segundo paso del proceso, como afirmara Mayr, sino el inicio del cambio evolutivo y (2), en cierta manera, la selección participa en la creación de la variación sobre la que actúa y no sólo la preserva [ib., 659].

Si aceptamos estos poderosos argumentos, se puede defender que la explicación darwinista es creativa y que atiende a causas eficientes actuando sobre individuos que forman agregados sobre los que es posible realizar inferencias de tipo estadístico.

La potencial capacidad creativa del proceso de selección natural conseguía satisfacer los dos objetivos fundamentales⁷⁰: secularizar el pensamiento biológico y reemplazar la explicación teleológica⁷¹ por otra que atendía sólo a causas eficientes. Dicho en otros términos, Darwin desea eliminar la forma de explicar ciertos fenómenos en la que se recurre a los fines u objetivos a los que los propios fenómenos contribuyen. En efecto, William Paley y Charles Darwin encontraron una solución distinta para explicar el sofisticado diseño que muestran los organismos. Para el reverendo, la adaptación es fruto de la mente del Creador que ha diseñado los seres vivos y organizado sus partes conociendo los fines. Darwin, sin embargo, demuestra que existen procesos naturales cuyo resultado parece haber sido fruto del diseño. Como ya advertimos, el naturalista de Down mantuvo que la selección natural no está dirigida a fines de ninguna manera significativa⁷² [Hull, 1974, p.51].

Es cierto que, en *El origen de las especies*, Darwin continua usando expresiones finalistas para dar cuenta del cambio y la adaptación. Por ejemplo, cuando afirma que “las modificaciones se acumulan sólo para el bien de los jóvenes o larvas” [1859, p.143]. No obstante, debemos recordar que también, en el capítulo 13 de su obra magna, Darwin explica la clasificación atendiendo a la unidad de descendencia para evitar el argumento

⁶⁹Gould no cree que esta cuestión sea imprescindible [2004, p. 172].

⁷⁰Cf. Castrodeza [2013, p. 88].

⁷¹Es difícil dar un conjunto de condiciones necesarias y suficientes para caracterizar cuando un sistema se comporta teleológicamente. Como afirma Godfrey-Smith “la familia de conceptos ‘teleológicos’ incluye los conceptos de fin, propósito y función” [2014, p. 59].

⁷²Otra cosa es que lo consiguiera. Para estudiar esta cuestión acudir a Lennox [2001].

teleológico. En esencia, Darwin defiende que las adaptaciones actuales están presentes en los organismos porque en la secuencia histórica han conferido cierta ventaja en la lucha por la vida. En efecto, la selección actuaría sobre la variabilidad, parte de la cual es azarosa y puede heredarse, al modo de causa eficiente de tipo newtoniano. Ésta sería la causa mecánica y no azarosa que finalmente soportaría la carga de la explicación. Con otras palabras, el concepto de lucha por la existencia englobaría una red de relaciones causales físico-biológicas muy concretas de tipo mecánico accidental, que darían una ventaja local a ciertos organismos con respecto a otros. Como se ha señalado, la iteración de la selección natural, es decir su historia evolutiva, es la que construye la adaptación observada en la actualidad y la aparición de estructuras complejas que asemejan el trabajo de planificación y diseño de un ingeniero. Si tenemos estas consideraciones en cuenta, se puede entender el lugar de la teleología en la explicación darwinista: cuando se desconoce la secuencia completa de cómo suceden los pasos intermedios de esa narración, a menudo se utiliza una metodología inversa a la ingenieril, preguntando por la función para aventurar hipótesis que puedan ser evaluadas, por ejemplo observando en el registro fósil. En otros términos, Darwin se pregunta por el valor adaptativo para explorar cómo la selección natural pudo conseguir construirlo.

En conclusión, Darwin no fue el primer naturalista que propuso una dinámica evolutiva de la vida. Tuvo antecesores próximos en otros autores como Buffón, Lamarck, Geoffroy, Erasmus Darwin, etc. Tampoco fue el primero en plantear la hipótesis del antepasado común, pues se le adelantaron otros autores - Buffon, Geoffroy, von Baer, Chalmers, etc -, ni el primer gradualista - e.g. Lamarck-. Darwin no descubrió la selección natural en sentido negativo, pues era admitida por autores como Edward Blyth, Lyell, etc. Además, tomó la idea de lucha por la existencia de Malthus y no fue el primero en considerar la fuerza creadora de la selección natural pues, como el propio Darwin reconoce en su resumen histórico, se le adelantó el fruticultor Patrick Mathews en su trabajo de 1831 “Madera de Construcción y arboricultura” y el físico William Charles Wells en 1812. Aunque, como Gould demuestra [Gould, 2004, p.163-164], ninguno de los dos reconoció la importancia trascendental del poder creativo de la selección natural. Por último, no fue el único naturalista que propusiera el PSN como causa principal de la evolución ya que lo presentó públicamente junto a A.R. Wallace.

Como hemos intentado justificar en este apartado, una de las contribuciones más importantes de Darwin a la biología evolutiva es el descubrimiento de la gran capacidad creadora del PSN, que, aplicado de forma iterativa, logró establecer una explicación detallada de la dinámica evolutiva de la vida respaldado por una inmensa evidencia empírica.

Capítulo 2

El camino hacia la abstracción

2.1. Introducción

En el capítulo anterior, se ha presentado con cierto detalle el devenir histórico de la explicación darwinista de tipo histórico narrativo. En esta segunda parte, se pretenden mostrar los hitos principales en la consecución de una formulación abstracta de la evolución por selección natural. El objetivo fundamental de las siguientes secciones será llegar a una posible representación matemática de la teoría darwinista con el objetivo de evaluar la plausibilidad de la analogía formal establecida por el Darwinismo Cuántico.

A pesar del tiempo transcurrido desde su creación, la teoría de la evolución por selección natural de Darwin está lejos de culminar su completa formalización. Actualmente, se está desarrollando en dos planos: el primero centra su atención en modelar cómo cambiará la composición genética de una población y el segundo pretende encontrar modelos de optimización que expliquen el diseño fruto de la selección. Los proyectos asociados a estos dos enfoques se encuentran desigualmente desarrollados. Los modelos de optimización se hallan en estado larvario. Todavía parece inalcanzable con fiabilidad predecir los posibles diseños resultado del proceso evolutivo [Grafen, 2009]⁷³. Por contra, desde la aparición durante la primera mitad del siglo XX de los trabajos pioneros de Ronald A. Fisher (1890-1962), J.S.B Haldane (1892-1964) y Sewall Wright (1889-1988), la genética de poblaciones se ha convertido en una de las ramas más fructíferas de la biomatemática. No obstante el largo recorrido de esta última, parece que cualquier formalización del darwinismo se encuentra todavía muy remota debido a los problemas que presenta la deseable unificación de los modelos de optimización y los elaborados por la genética de poblaciones.

Teniendo en cuenta el estado de la cuestión referido, en las secciones siguientes, no se tratarán los modelos de optimización, ya que en el Darwinismo Cuántico no hay lugar para argumentaciones basadas en considerar la adaptación como fruto de diseño óptimo.

⁷³Agradezco a Cristian Saborido y Giorgio Airoidi su invitación al seminario que impartió Alan Grafen en la Universidad de Educación A Distancia el lunes 4 de abril de 2014. Un magnífico resumen del proyecto de Grafen se encuentra en [Airoidi, 2014].

Como veremos, la analogía cuántica se despliega de forma natural dentro del marco de la inferencia estadística, por este motivo, nos ocuparemos del ascenso formal del darwinismo en relación a la genética de poblaciones, restringiendo el estudio a aquellos modelos con reproducción asexual.

2.2. Genética mendeliana y bioestadística

Como se ha comentado en la introducción al preámbulo, las ideas de Darwin esbozadas en los apartados anteriores son el suelo fértil sobre el que han surgido los distintos enfoques y debates evolutivos hasta nuestros días.

Una parte importante de la historia diacrónica del darwinismo está relacionada con la necesidad de superar algunas de las grandes dificultades que Darwin tuvo que afrontar. Por ejemplo, las consecuencias lógicas de su adopción de un tipo de herencia débil basada en la mezcla de caracteres⁷⁴. El efecto negativo de este compromiso para la explicación darwinista se sustancia en la necesidad de disponer continuamente de un número grande de entidades que presenten cierta variabilidad en los rasgos para que la mezcla de caracteres debida al cruzamiento reproductivo no acabe anulando la variabilidad y, con ella, la posibilidad de traspasar el límite intraespecífico. Éste fue el poderoso argumento estadístico esgrimido por Fleeming Jenkin (1833-1885) contra la eficacia de la selección. El ingeniero escocés negaba la posibilidad de creación de especies nuevas por selección de pequeñas diferencias individuales, independientemente de la intensidad de la selección y de que ésta pudiera producir un desplazamiento de la característica media de una población [1867, pp. 277-318].

Este problema se pudo resolver [Fisher, 1958, pp. 1-12], no si dificultades⁷⁵, cuando se fusionaron la biometría⁷⁶, que estudiaba la representación y tratamiento estadístico de la variación fenotípica⁷⁷ entre los individuos de una población, y las leyes de la herencia fuerte de tipo mendeliano, según las cuales, ciertos elementos, posteriormente denominados

⁷⁴En efecto, apoyándose en su teoría de la herencia, la pangénesis [Darwin, 1868, cap. XXVII], Darwin intentaba explicar cómo se producía la herencia de los caracteres adquiridos para poder contrarrestar los argumentos saltacionistas. Esta hipótesis planteaba la posibilidad de que se generaran gémulas de tipos y proporciones distintas en las diversas partes del cuerpo. Gracias a la reproducción, las gémulas de los progenitores pasan a las distintas generaciones. Las características de los individuos son producto de la calidad y cantidad de dichos pangenes heredados, si bien existe la posibilidad de que algunos se puedan fusionar o se encuentren en estado latente hasta que se “despierten”, aunque Darwin no explique el mecanismo de activación. Así pues, se produce una tipo de mezcla pesada por el número de gémulas y la calidad de éstas. El hecho de que los pangenes procedan de distintas partes del cuerpo conlleva que cualquier cambio en éstas, debido al uso y desuso o a la influencia del ambiente, tenga consecuencias para la herencia.

⁷⁵Recuérdese el periodo en el que los mutacionistas como Hugo de Vries, más arriba mencionado, abogaron por el carácter creativo de la variación en detrimento de la selección natural, a la que como mucho relegaban el papel de mero filtro.

⁷⁶Fundada por Francis Galton (1822-1911) y Karl Pearson (1857-1936).

⁷⁷El fenotipo o rasgo lo conforman los atributos de tipo morfológico, fisiológico, bioquímico o de comportamiento de un individuo.

genes⁷⁸, explicaban los rasgos heredables de los individuos que pasan casi sin alteración entre generaciones siguiendo unas reglas específicas de combinación.

En el artículo de 1918 titulado *The Correlation between Relatives on the Suppositions of Mendelian Inheritance*, Ronald A. Fisher abrió el camino a la unificación de la biometría y la genética mendeliana demostrando la compatibilidad entre el cambio continuo propuesto por Darwin y el carácter discreto de la herencia de tipo mendeliano. Más concretamente, se adhirió al gradualismo de Darwin al mostrar la posibilidad de que rasgos de tipo continuo como la altura, relacionados con un conjunto grande de genes que aportaban pequeñas diferencias al rasgo, condujeran a una distribución normal⁷⁹ del rasgo en la población [Depew y Weber, 1995, pp. 244-245].

La coronación del proyecto de unificación emprendido por Fisher se encuentra en su libro *The Genetical Theory of Natural Selection* (1930 y 1958). Como reconoció el propio autor, la teoría genética de la selección natural nació bajo la inspiración de la termodinámica en la formulación novedosa de la física estadística debida a Maxwell y Boltzmann [Fisher, op. cit., 39]. En efecto, tanto en el caso de la física como en el de la biología, se pretendían describir los comportamientos macroscópicos y se calculaban los valores de las propiedades de poblaciones como resultado de la contribución estadística de microentidades: las moléculas, en el caso de la física, y los genes, en el de la biología. Por ejemplo, la explicación de fenómenos macroscópicos como la temperatura se puede describir en términos de la velocidad media de las moléculas de un gas, al igual que, para la genética de poblaciones, el cambio evolutivo medio, correspondiente a la variación de aptitud de una población de genes, se calcula mediante el cambio medio de las frecuencias génicas.

Fisher [ib., 38-40] refiere explícitamente la semejanza de relaciones entre el segundo principio de la termodinámica y la ecuación de Hardy-Weinberg (1908). El primero afirma la existencia de una tendencia de tipo probabilístico al equilibrio termodinámico - o estado de máxima uniformidad estadística - para todo sistema cerrado en el que se produce la interacción entre las distintas moléculas de un gas en el supuesto de que todos los movimientos moleculares son igualmente posibles. La segunda sostiene, análogamente, la tendencia al equilibrio entre las frecuencias relativas de dos alelos⁸⁰ de una población de genes cuando dicha población tiende a infinito, los cruzamientos aleatorios del mismo individuo tienen las mismas posibilidades y no están presentes las mutaciones, la selección y no se incorporen nuevos miembros a la población (e.g. migración).

⁷⁸El concepto de gen forma parte de los grandes debates en biología. No obstante, en este caso nos referimos a la unidad de herencia discreta, que puede estar representada por una secuencia de ADN, que codifica el ARN o una proteína.

⁷⁹La distribución normal se conoce también por el nombre de campana de Gauss.

⁸⁰Los alelos son las variantes de una secuencia de ADN en un lugar (*locus*) o misma localización de un genoma. En concreto, la ecuación de Hardy-Weinberg relaciona las frecuencias genéticas para dos alelos en un lugar (*locus*) genético. Si las frecuencias de los alelos "A" y "a" son respectivamente p y q , en la primera generación las frecuencias de los tres genotipos diploides de los cigotos descendientes serán: p^2 de AA, q^2 de aa y $2pq$ de Aa, de tal suerte que $p^2 + q^2 + 2pq = 1$.

Para organismos haploides cuya reproducción es asexual, que es la fuente de la analogía que deseamos estudiar, la tendencia al equilibrio es un caso particular del denominado teorema fundamental de la selección natural formulado por Fisher (1930):

“La proporción de incremento en la eficacia de un organismo en cualquier momento es igual a su variancia genética en eficacia en ese momento.”⁸¹[Fisher, 1958, p. 37].

Por lo tanto, la analogía entre la mecánica estadística y la genética de poblaciones se sigue de la siguiente manera: en un sistema sin fuerzas disipativas, la entropía permanece constante al igual que en una población biológica de organismos haploides con reproducción asexual cuya variancia se anula, se mantendrá constante la eficacia media de un rasgo⁸²[ib., p.38].

Más allá de los límites de plausibilidad de esta analogía⁸³ y de las disputas históricas sobre la interpretación del teorema, hay dos cuestiones de principal relevancia para nuestro trabajo: una atiende al uso y significado del concepto de eficacia y la otra está relacionada con las implicaciones de tipo epistémico y metodológico consecuencia de este nuevo enfoque estadístico.

En lo referido a la eficacia⁸⁴, es importante señalar que este concepto en la teoría de Fisher⁸⁵ no depende exclusivamente de un genotipo o de las propiedades de un individuo,

⁸¹Una versión moderna del teorema sería según Edwards (1994) “la proporción de incremento en la eficacia media de un organismo en cualquier momento debido a la selección natural actuando a través de los cambios de las frecuencias de los genes es exactamente igual a su variancia genética en eficacia en ese momento” [apud. Hamilton, 2009, p. 203].

⁸²Matemáticamente, el teorema fundamental toma como rasgo de estudio la propia eficacia, que Fisher mide según el parámetro de Malthus m (ver en nota 12, p.46). El cambio en la eficacia media, que es la suma ponderada de las eficacias individuales, es proporcional a la variación en eficacia que se hereda ($\dot{m} = Var_m$). Debido a que la variancia se define por la media de los cuadrados de las desviaciones entre los valores individuales de la eficacia y la eficacia media $Var_m = \frac{1}{N} \sum [(m_i - \bar{m})^2]$, la variancia nula implica que los valores de la eficacia no se desvían de la medida. Esto quiere decir que todos los valores descansan en la recta $m = constante$. Con otras palabras, hay estabilidad en torno al valor medio de la eficacia pues los valores individuales coinciden con la media con probabilidad uno.

⁸³Recordemos que el propio Fisher fue consciente de las posibles deficiencias [q.v. ib., 39 y 40].

⁸⁴La eficacia absoluta (λ), o ratio de incremento de la población, es la relación entre el número de individuos entre dos instantes posterior y anterior ($N_{t+1} = \lambda \cdot N_t$). En genética de poblaciones, el concepto operativo más utilizado son las frecuencias relativas (ω_i) de los genotipos de los individuos que forman dicha población, que pueden medirse mediante la proporción de progenie respecto a la media de la población o respecto al individuo más exitoso ($\omega_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}$) cuya medida de eficacia correspondería a la unidad. Por lo tanto, la eficacia es un número entre cero y uno. Apoyados en esta definición, se calcula la eficacia medida $\bar{\omega}$ como la suma pesada de las eficacias relativas de cada genotipo de la población por sus respectivas frecuencias ($p_i = \frac{N_i}{N_{total}}$). Esto es, $\bar{\omega} = \sum_i p_i \omega_i$. Una población evoluciona cuando se producen cambios en las frecuencias relativas o en la consecuente eficacia relativa medida.

⁸⁵La interpretación de Fisher se basa en el denominado parámetro de Malthus “ m ”, que representa el ratio de incremento relativo de los tipos en una población.

Es decir, $\frac{dN_t}{dt} = mN_t$, cuya solución es $N_t = N_0 e^{mt}$ y, por lo tanto, su relación con la eficacia absoluta $\lambda = e^{mt}$.

más bien toma significado al nivel de la población pues representa el ratio de éxito reproductivo comparativo de los organismos de dicha población.

De hecho, la eficacia de Fisher no se deduce de la relación entre los rasgos de los organismos y la economía de la vida. Este último significado es el que Darwin asigna al famoso título del capítulo cuarto de la quinta edición de *el Origen de las especies* “La selección natural o la supervivencia del más apto (*fittest*)”. En este caso, la eficacia o aptitud refiere a la óptima relación entre el entorno y los rasgos particulares del individuo que le dotan de mayor probabilidad para sobrevivir y reproducirse. Dicho de otro modo, la eficacia corresponde al individuo, cuyo diseño en relación con el ambiente es la razón o causa de la supervivencia.

2.3. Consecuencias epistemológicas y metodológicas de la teoría genética de la selección natural.

Esta diferencia entre el concepto de eficacia individual y el referido al grupo tiene profundas consecuencias epistemológicas y metodológicas.

Con respecto a las primeras y como se ha referido más arriba, Darwin construye su explicación apoyándose en una descripción de una secuencia causal. Por contra, la explicación en la teoría genética de la selección natural se construye a través de un modelo matemático. Es decir, Fisher desplaza a un segundo plano el marco newtoniano⁸⁶. Como acabamos de ver, la analogía con la mecánica estadística reposa por un lado en la mecánica newtoniana, pues los choques moleculares son causas eficientes puramente mecánicas del comportamiento global de gases y fluidos, pero el balance total sólo se puede entender en términos estadísticos. De esta manera, el equilibrio derivado del segundo principio de la termodinámica y de su análogo en la genética de poblaciones más que compensación o ausencia de fuerzas se explica como consecuencia de un estado de máxima uniformidad⁸⁷.

Dicho de otra manera, la teoría genética de la selección natural al poner énfasis en los efectos estadísticos a nivel de la población explica el cambio mediante inferencia estadística.

Si λ es próxima a 1, tenemos $\lambda = m$.

Pues bien, el parámetro de Malthus mide la eficacia “mediante el hecho objetivo de la representación en futuras generaciones” [ib., 37]. En otros términos, el concepto de eficacia de Fisher puede definirse como la proporción o ratio de incremento de un tipo *per capita* [Michod, 1999, p.17]. El problema con esta interpretación es que se asume que las proporciones de nacimientos (b) y muertes (d) *per capita* para este parámetro $m = b - d$ son constantes y esto no se puede mantener en una población que cambia, especialmente si la eficacia se ve influida por la interacción entre genotipos o si la reproducción es sexual [ib., p. 11]. Teniendo esto en cuenta, si las densidades o frecuencias relativas de los tipos se representan por p_i , entonces la eficacia de Fisher no es más que:

$$F_i \equiv \frac{1}{p_i} \frac{dp_i}{dt} \quad (2.1)$$

⁸⁶Entre otras razones, para solucionar las dificultades aludidas respecto a la necesidad de variabilidad continua y los retos planteados por el saltacionismo.

⁸⁷Ver por ejemplo [Depew y Weber, op.cit., 252-254].

En efecto, actualmente en genética de poblaciones, hay dos analogías que están en liza para describir la evolución. La versión tradicional sostiene que los cambios surgen debido a una fuerza resultante derivada de una combinación de fuerzas representadas por la selección natural, la deriva genética, la mutación y la migración. En ausencia de fuerzas, la ley de Hardy-Weinberg tomaría el papel de la inercia o primer principio de la dinámica. Contra esta visión, ha surgido el denominado enfoque estadístico que entiende la evolución como resultado global al nivel de una población. Esto implica, como veremos, centrar el estudio evolutivo en la dependencia comparativa de los rasgos de las entidades que forman parte de esos agregados.

La perspectiva estadística puede iluminar de manera diferente ciertos aspectos controvertidos de la TSN. Esta cuestión es relevante para el objetivo de nuestro estudio, por ejemplo en relación a la controversia sobre la naturaleza creativa del proceso de selección natural. Para el enfoque estadístico, este problema se disuelve más que se resuelve porque la selección no explica cuál es el rasgo particular de un individuo o el nivel al que actúa la selección, pues, en principio, sólo se trata de contabilizar entidades independientemente de su naturaleza - e.g. genes, especies, memes, estados cuánticos, etc. -.

A tenor de estos argumentos, parece claro que la genética de poblaciones comenzó a instaurar una diferencia fundamental entre la causa de la selección natural - la interacción entre los individuos que forman una población junto a las condiciones de existencia - y la manera de contabilizar las unidades sobre las que se calculan los valores medios de los rasgos que indicarán la amplitud del cambio.

Como veremos más adelante, este desdoblamiento entre agencia y contabilidad culmina en la distinción, por parte de algunos teóricos, entre las unidades de replicación - e.g. los genes - y las unidades de interacción - e.g. los organismos-. Es más, lo que sin duda es de extrema importancia para la tesis que defendemos, este nuevo enfoque estadístico facilita el establecimiento de todo tipo de analogías darwinistas en el contexto de la teoría de la información, ya que la representación del proceso tiene como fuente los modelos de datos que pueden tratarse mediante modelos matemáticos tomados de la teoría de la comunicación. Una vez situados bajo este marco de referencia, parece natural interpretar la evolución como transferencia de información entre los individuos y el entorno. Esta importante cuestión se desarrollará en la sección final (p. 55).

En relación a las cuestiones metodológicas derivadas de la formulación y explicación del proceso evolutivo en términos de la genética de poblaciones, se pueden destacar dos consecuencias: (1) la explosión de la modelización como método teórico-experimental y (2) la elaboración de sumarios cuyos objetivos principales pretenden: (i) prescribir las condiciones suficientes para que una población de entidades evolucionen por selección natural y (ii) determinar en qué condiciones un proceso cualquiera es análogo al proceso darwinista descrito mediante una receta universal de la TSN.

Si nos centramos en la elaboración de sumarios, estamos de acuerdo con Godfrey-Smith⁸⁸ en que los objetivos para predecir el cambio en una población son distintos de aquéllos que pretenden capturar todos los casos mediante un sumario de la TSN. En otros términos, hay diferencia entre responder a una cuestión causal y hacerlo a una constitutiva [2007, pp. 489-491]. Esto supone un obstáculo si se desean satisfacer las dos tareas con eficacia. La razón de fondo se encuentra en que, como en el caso de la modelización, la confección de los sumarios se lleva a cabo mediante operaciones de: (1) idealización, es decir, se produce la distorsión de algunas propiedades del sistema - e.g. introducir información que sabemos falsa como en el caso de poblaciones ideales - y (2) abstracción, esto es, se ignoran algunas propiedades de los sistemas. La idealización condiciona la estrecha relación entre el número de casos incluidos en el sumario y el necesario ajuste para garantizar una buena predicción. Con otras palabras, el aumento de poder predictivo acarrea una pérdida de generalidad. En cambio, la alta abstracción facilita la generalización pero a costa de disminuir la capacidad predictiva.

No obstante, lo que comparten los dos enfoques, el predictivo y el constitutivo, es la manifestación del cambio. Si se pretende caracterizar el proceso de evolución por selección natural (TSN), entonces se precisa diferenciar entre los cambios debidos a la selección natural y aquéllos producidos por el azar, las migraciones, una variación intensa dirigida por el entorno, etc.

2.4. La Selección Natural en abstracto

Como el objetivo de la tesis es constitutivo, pues se intenta dilucidar si un proceso es darwinista, entonces el método más conveniente a seguir, con las debidas precauciones, es el dictado por el proceso de abstracción.

La reconstrucción del argumento de Darwin, esbozada en el capítulo primero, puede servir de guía para encontrar las ecuaciones de la “dinámica darwinista”. Ahora bien, no es necesario que se siga estrictamente el orden lógico de dicho argumento como si se tratara de la única secuencia de pasos que caracteriza la TSN. De forma general, podemos decir que la teoría de la evolución por selección natural es el proceso desplegado en el tiempo al que se ve sometida una población de individuos y del que, como vimos, puede esperarse la consecución de cambios basado en tres conceptos principales: variación, heredabilidad - transmisión de los cambios- y eficacia diferencial - en el argumento de Darwin, la “lucha por la existencia” -.

Una de las formulaciones más extendida del esquema darwinista orientada claramente a lograr la abstracción del proceso se debe a Lewontin [Levins,1985, p. 76]:

⁸⁸ Si se desea considerar los detalles de esta sección, en la exposición seguimos ampliamente la esclarecedora y precisa argumentación de Godfrey-Smith, [2009, cap.2; 2014, cap. 3].

“Un mecanismo suficiente para la evolución por selección natural se contiene en tres proposiciones: (1) Hay variaciones en los rasgos morfológicos, fisiológicos y de comportamiento entre los miembros de una especie (principio de variación) ; (2) La variación es en parte heredable, de tal suerte que los individuos se parecen más a aquellos con los que están relacionados que a otros con los que no lo están y , en particular, la descendencia se parece a sus progenitores (principio de herencia) ; (3) Diferentes variantes dejan diferente número de descendientes tanto en las generaciones inmediatas como en las remotas (principio de eficacia diferencial)

Es importante notar que estas tres condiciones conjuntamente son tanto necesarias como suficientes para la evolución por selección natural.”

La síntesis del darwinismo presentada en este sumario muestra disparidades importantes respecto a la reconstrucción que se ha elaborado en el capítulo anterior. En primer lugar, a diferencia del resumen de Lewontin, Darwin explicita la importancia de la iteración del principio de selección natural (PSN) para obtener el cambio y la adaptación. En segundo lugar, se entiende de manera distinta el principio de eficacia diferencial: para Darwin, la “lucha por la existencia” incorporaba tanto la capacidad de supervivencia como la fecundidad reproductiva. En efecto, Darwin insiste en que el individuo se ve sometido a una lucha por la existencia constante y excepcionalmente intensa⁸⁹. Como apuntamos en el apartado histórico, el argumento maltusiano se apoya en que el incremento enorme de la población se ve restringido en un entorno con recursos limitados. Esto, claro está, no supone necesariamente la desaparición de aquellos individuos con características menos aptas en su relación con el entorno. Ahora bien, si la capacidad reproductiva diferencial de cada individuo fuera el rasgo esencial distintivo de la lucha por la existencia, entonces no sería necesaria la escasez de recursos y, por lo tanto, Darwin podría haber prescindido del argumento de Malthus. En consecuencia, si por eficacia diferencial entendemos simplemente alta fecundidad, entonces el proceso no parece coincidir plenamente con el argumento de Darwin⁹⁰. Así pues, los sumarios se deben tomar con las debidas precauciones, ya que pueden esconder o alterar puntos esenciales de lo que se entiende por darwinismo.

⁸⁹Seguimos a Lewens [2010, pp. 829-835].

⁹⁰Por este motivo, Lewontin aclara que la razón de que algunas de las variantes dejen más descendencia que otras se debe a su capacidad para afrontar los desafíos del entorno, bien sea en la competencia con otros organismos por los recursos en momentos de escasez, bien sea por la presión fisiológica (c.f. [Dieguez, 2012, p.54]).

2.4.1. La ecuación de Price

Una vez tenidas en cuenta estas consideraciones, el objetivo deseado es encontrar un conjunto de ecuaciones, basadas en las tres condiciones apuntadas, que representen el proceso de evolución mediante selección natural.

Tal vez el esquema formal de generalización más unificado lo constituye la denominada ecuación de Price [1970; 1972], pues atrapa el proceso de evolución de una población intergeneracional con gran generalidad y alto nivel de abstracción. Lo consigue gracias a centrar su objetivo en el seguimiento de cada individuo de una población para poder comparar estadísticamente los rasgos de las entidades agregadas entre poblaciones progenitoras y su descendencia.

A primera vista, este proyecto parece avocado al fracaso pues antes se afirmó la imposibilidad de unificar todos los casos de selección natural en un único sumario o una única ecuación y, a la vez, dotar al modelo de eficacia predictiva. Esto era consecuencia de la diversidad de maneras en que las entidades se pueden reproducir, del distinto tipo de interacciones con el entorno - que influye en la diferencias de eficacia -, de los tipos dispares de unidades de evolución, etc.

La aparente paradoja de este planteamiento se disuelve teniendo en cuenta que la ecuación de Price se puede considerar como un marco, esquema o boceto de generalización⁹¹. En pocas palabras, el teorema de Price sólo muestra contenido empírico una vez que se aplica a un modelo específico dentro de un marco teórico determinado.

En efecto, la ecuación de Price no es fruto de un proceso de idealización sino de abstracción. Requiere exclusivamente de la especificación de conjuntos para establecer vínculos entre ellos y sus correspondientes relaciones. En el caso de la biología, la conexión empírica o interpretación debe precisar el tipo de entidades (individuos) que componen esos conjuntos, que muestran diferencias en ciertos rasgos (fenotipo), cuya relación progenitor-descendiente cambia en el tiempo⁹².

El esquema representado por la ecuación de Price sería análogo⁹³ al segundo principio de la dinámica en el que se relaciona la fuerza o cambio de momento con la masa y la aceleración. Como es bien conocido, no es posible asignar contenido empírico a la segunda ley de Newton sin precisar un modelo concreto que le dote de capacidad predictiva. Esto supone encontrar las expresiones para las distintas fuerzas o interacciones entre los sistemas - eg. elástica, gravitatoria, electromagnética, etc.- y fijar las condiciones de contorno - e.g. posición y velocidad inicial -.

Hay diversas formas de deducir y expresar matemáticamente la ecuación de Price⁹⁴, siguiendo a Okasha [2006, p.22] y Frank [2012a]:

⁹¹En este análisis seguimos principalmente a [Luque, 2017], [Godfrey-Smith, 2007a], [Okasha, 2006] y [Frank 2012a].

⁹²Según Rice [2004], c.f. [Luque, 2017].

⁹³Según Luque [2017, p. 13], siguiendo el concepto de esquema o generalización de Kuhn.

⁹⁴Una copiosa muestra se presenta en [Luque, 2017].

- (1) sea una población compuesta por i entidades -independiente de su naturaleza- con rasgos correspondientes z_i , y
- (2) cuya frecuencia o fracción de entidades en la población correspondiente es q_i ,
- (3) entonces, el valor medio del rasgo en dicha población \bar{z} será la suma ponderada de los rasgos de los individuos, esto es, $\bar{z} = \sum_i q_i z_i$.

Si denotamos los valores correspondientes del conjunto de descendientes mediante $\{z'_i; q'_i; \bar{z}'\}$, entonces,

- (4) el cambio intergeneracional en el valor medio del rasgo en una población $\Delta\bar{z} = \bar{z}' - \bar{z} = \sum_i q'_i z'_i - \sum_i q_i z_i$,
- (5) si la relación entre la población progenitora y la descendiente se establece mediante la eficacia w_i que cuantifica el número total de descendientes que produce la entidad i correspondiente y
- (6) la eficacia media de la población de progenitores es $\bar{w} = \sum_i q_i w_i$, entonces,
- (7) la frecuencia del número de descendientes de la entidad i (q'_i) en una población está relacionada con la frecuencia de los progenitores q_i según: $q'_i = \frac{q_i w_i}{\bar{w}}$.
- (8) Si el valor del rasgo se transmite a la descendencia, tenemos que, en el caso de que éste no varíe, $z_i = z'_i$ y en caso de una transmisión cuya fidelidad no sea perfecta (8 a) $z'_i = z_i + \Delta z_i$, por lo tanto (8b) $\Delta z_i = z'_i - z_i$ representa el sesgo introducido debido a la transmisión, o sea la diferencia entre el valor del rasgo de la entidad i z_i y la media de su descendencia z'_i .
- (9) Teniendo en cuenta el cambio debido a la supervivencia diferencial y la reproducción $\Delta q_i = q'_i - q_i$,
- (10) el cambio intergeneracional en el valor medio del rasgo en una población ($\Delta\bar{z} = \bar{z}' - \bar{z}$), se obtiene sustituyendo en (4) las relaciones (8a) y (8b) y acomodando el resultado a dos partes, la primera correspondiente al cambio de rasgo Δz_i y la segunda, a la supervivencia y reproducción diferencial (9), es decir, Δq_i . Por lo tanto, teniendo en cuenta (7) que implica $\Delta q_i = q_i \left(\frac{w_i}{\bar{w}} - 1 \right)$ se encuentra:

$$\Delta\bar{z} = \sum_i q_i \left(\frac{w_i}{\bar{w}} - 1 \right) z_i + \sum_i q_i \frac{w_i}{\bar{w}} (\Delta z_i) \quad (2.2)$$

- (11) Si utilizamos las definiciones estadísticas de covariancia⁹⁵ - entre dos variables aleatorias, una asociada a los rasgos (z_i) y otra a la eficacia (w_i) - y de esperanza medida, llegamos a la ecuación de Price:

$$\bar{w}\Delta\bar{z} = Cov(w_i, z_i) + E(w_i\Delta z_i) \quad (2.3)$$

Así pues, las dos componentes que describen el cambio de rasgo medio son: (1) el término de la covariancia y (2) el valor estimado para el cambio del rasgo (Δz_i), pesado según su eficacia relativa [Okasha, op.cit., 35]. Como hemos apuntado en (8), este valor medio informaría sobre la fidelidad de transmisión del carácter. Si el rasgo heredado es una copia perfecta o su fidelidad es muy alta, como en el caso de la analogía que vamos a estudiar, este término se anularía $E(w_i\Delta z) = 0$ y, sólo sería distinta de cero la componente de la covariancia.

$$\Delta\bar{z} = \frac{1}{\bar{w}}Cov(w_i, z_i) \quad (2.4)$$

Si tomamos el valor de la eficacia relativa en vez de la absoluta, esto es, $\omega_i = \frac{w_i}{\bar{w}}$, finalmente obtenemos:

$$\Delta\bar{z} = Cov(\omega, z) \quad (2.5)$$

El término de la covariancia, que es una relación entre el rasgo y la eficacia relativa, captura el concepto de selección natural. El cambio intergeneracional en el valor medio del rasgo toma valores positivos o negativos dependiendo de la covariancia. Si la eficacia relativa aumenta sobre la media con un valor del rasgo elevado entonces la selección incrementa el cambio intergeneracional del valor medio del rasgo. Si con ese valor elevado del rasgo la eficacia relativa disminuye con respecto a la media, entonces se produce un decrecimiento del cambio del valor medio del rasgo intergeneracional. Cuando la covariancia se anula, no existe correlación entre los rasgos y la eficacia relativa. En general la independencia entre las dos variables anula la covariancia, lo que significa que el valor medio del rasgo entre generaciones se mantiene constante.

⁹⁵Recordemos que si x es un posible valor de una variable aleatoria X , con distribución de probabilidad $p_X(x)$, la esperanza de $E[X]$ se define como $E[X] = \sum x p_X(x)$ y que la variancia de X será equivalente a la esperanza de la variable aleatoria $(X - E[X])^2$, o sea $var(X) = E[(X - E[X])^2]$ que en término de los momentos equivale a $var(X) = E[X^2] - (E[X])^2$. Para dos variables aleatorias X e Y , se define la covariancia como la esperanza de su producto menos el producto de sus esperanzas $cov(X, Y) = E[XY] - E[X]E[Y]$. La relación entre la covariancia y la variancia, cuando éstas no son cero, se establece mediante el coeficiente de correlación $\beta(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{var(X)var(Y)}}$ donde $-1 \leq \beta(X, Y) \leq 1$ [Bertsekas y Tsitsiklis, 2008].

Finalmente, contemplaremos dos escenarios formales para el estudio de la analogía darwinista: el primero pretende formalizar las condiciones de Lewontin arriba señaladas y el segundo particularizarla al teorema fundamental de Fisher.

Es posible representar matemáticamente las condiciones de Lewontin anteriormente enunciadas según la siguiente expresión⁹⁶ tomada de Okasha [op. cit., 36]:

$$\Delta \bar{z} = h \cdot \beta_{\omega z} \cdot \text{Var}(z) \quad (2.6)$$

Los tres términos a la derecha de la igualdad deben ser distintos de cero:

- 1.- La variación fenotípica ($\text{Var}(z) \neq 0$).
- 2.- La heredabilidad ($h \neq 0$)
- 3.- La diferencia en eficacia asociada al rasgo, que es el coeficiente de regresión de la eficacia ω sobre el rasgo de los progenitores z y está representada por $\beta_{\omega z}$, debe ser distinta de cero ($\beta_{\omega z} \neq 0$).

Si se toma como rasgo la propia eficacia relativa de los descendientes $\omega' = z$, entonces se obtiene la forma más general del teorema fundamental de la selección natural de Fisher como caso particular de la ecuación de Price. La expresión matemática del teorema más adecuada a la analogía que pretendemos evaluar requiere⁹⁷ organismos que se reproduzcan mediante clonación, haploides y restringido al caso discreto, a saber:

$$\Delta \bar{\omega} = h \beta_{\omega \omega'} \text{Var}(\omega) \quad (2.7)$$

La versión dada por Fisher de este teorema es:

$$\Delta \bar{\omega} = \text{Var}(\omega) \quad (2.8)$$

El teorema fundamental de Fisher expresa el cambio parcial en la eficacia media resultado de la selección natural cuando el entorno permanece inalterado [Okasha, 2007, p. 292]. Esta condición sobre el carácter del ambiente es importante porque se puede acomodar a la versión del darwinismo en términos del gen defendida por Richard Dawkins [1976] y G.C. Williams [1966]. De hecho, algunos académicos hablan de Fisher como precursor de esta corriente [q.v., ib., 293]. En ella, como presentaremos en la siguiente sección, la selección actúa sobre ciertas entidades individuales, los genes (alelos) y mantiene el entorno

⁹⁶Si tenemos en cuenta que el factor de heredabilidad “ h ” relaciona la covarianza de los descendientes y los progenitores $\text{Cov}(w, z') = h \text{Cov}(w, z)$ y esta covarianza se puede expresar en términos de la variancia según $\text{Cov}(w, z) = \beta_{\omega z} \text{Var}(z)$, donde $\beta_{\omega z}$ es el coeficiente de regresión de la eficacia ω sobre el rasgo de los progenitores z . Entonces $\Delta \bar{z} = h \beta_{\omega z} \text{Var}(z)$.

⁹⁷En general las tres condiciones requeridas no son necesarias para obtener el teorema de Fisher que puede aplicarse a organismos diploides, etc.

sin variación. La selección natural expresa la reproducción diferencial de los genotipos, por lo que el cambio se circunscribe a las frecuencias génicas.

Hay diferencias notorias entre las dos versiones del teorema fundamental⁹⁸. En contraste con la propuesta de Fisher (2.8), la variancia deducida de la ecuación de Price procede de la covariancia entre progenitores y descendientes. Ésta se puede expresar, como hemos visto en la formulación de las condiciones de Lewontin, en términos de una variancia heredable, que puede ser negativa. Dicho de otro modo, hay posibilidad de que los descendientes sean menos eficaces que los progenitores. Sin embargo, en el teorema fundamental enunciado por Fisher, la variancia es aditiva. Esto quiere decir que los genes (alelos) contribuyen de manera independiente al cambio en eficacia. Por lo tanto, no hay interferencia entre genes, lo que significa que la eficacia sólo depende del genotipo del individuo. En este caso, la variancia es siempre mayor o igual a cero y el aumento de variabilidad implica un aumento en la eficacia. Esto se debe a que Fisher contempla una herencia de tipo mendeliano y, en consecuencia, el teorema en la versión de Fisher carece de la generalidad pretendida.

2.4.2. El darwinismo como transferencia de información

Antes de continuar, es necesario advertir que el debate actual sobre el uso del concepto de información en biología desbordaría los límites y objetivos de esta tesis⁹⁹. El denominado “discurso de la información” puede entenderse como el estadio intermedio necesario entre la metáfora y la configuración de una teoría¹⁰⁰. Baste señalar que una parte importante de los filósofos de la biología piensan que el concepto sintáctico de información carece de las características semánticas y funcionales relevantes para la biología. Para algunos autores como Shankar, el concepto se utiliza como metáfora disfrazada de concepto teórico [Shankar, 2009, p.59]. Este punto de vista contrasta en líneas generales con el de aquellos biólogos teóricos para quienes la información en biología se debe entender “más o menos en el espíritu de la teoría de la información” [Maynard, 2000]. Es decir, en sentido sintáctico.

En lo que a la dinámica evolutiva concierne, el concepto de información se encuentra en el centro del debate en torno al determinismo genético. Para sus defensores, los genes son portadores de información sobre el desarrollo. Por contra, sus detractores defienden la paridad entre información genética y epigenética. Para poder romper la simetría entre estos dos tipos de información, autores como John Maynard Smith o Eva Jablonka abogan por una concepción teleosemántica del concepto. El biólogo inglés impulsó el desarrollo de un programa filosófico naturalizador de la intencionalidad de la información de carácter genético para reducir el significado a función biológica y ésta a selección natural. Según Moffatt, la bióloga polaco-israelí defiende que una interacción se puede entender como informativa “si el sistema de interpretación del receptor ha desarrollado una reacción consistente a las variaciones en la organización o forma de una fuente” [2016, 284].

⁹⁸En esta aclaración seguimos a Okasha [2007, 295-297].

⁹⁹Un resumen de este debate se puede encontrar en [Moffat, 2016].

¹⁰⁰“Genetic Information: A Metaphor in Search of a Theory” [Griffith, 2001].

A lo largo de esta sección, evitaremos entrar en el debate sobre el pluralismo semántico que incorpora el concepto de información. El objetivo final de este apartado es encontrar algún modelo matemático que resuma el proceso evolutivo en términos de información. Mas concretamente, un esquema similar a la ecuación de Price cuya estructura matemática incorpore alguna medida de información.

Como es bien conocido, a mediados de los años cincuenta del siglo pasado y tan sólo después de una década de la formulación de la teoría matemática de la comunicación por Claude Shannon [1948], irrumpió con fuerza el concepto de información en biología al hilo del descubrimiento de las estructuras de los ácidos nucleicos¹⁰¹. Las moléculas portadoras de las propiedades hereditarias muestran una arquitectura análoga a una escalera helicoidal compuesta por dos cadenas de polinucleótidos: los peldaños los componen la unión de dos bases nitrogenadas ensambladas a pares (adenina (A) - timina (T); citosina (C) - guanina (G)) y fijadas en sus extremos respectivos a una estructura formada por azúcar (dexosirribosa) y un grupo fosfato.

La disposición de las bases nitrogenadas en forma de secuencia y su estabilidad las convertían en una posible fuente de información. Más concretamente, se interpretó el código genético como el proceso de asignación de los tripletes de letras del alfabeto o codones - identificadas por tres bases de las cuatro posibles - a los correspondientes aminoácidos cuya polimerización constituía las proteínas responsables de ciertas funciones biológicas¹⁰².

De esta manera, el concepto de información se convirtió en un término común en biología molecular y, especialmente, en genética. Gracias al éxito de estas disciplinas, se extendió rápidamente a toda la biología. Fue tal su impacto, que pronto se reconoció como una manera renovada de enfocar la “lógica de lo viviente” [Jacob, 1972].

Lo cierto es que, bajo el marco conceptual de la información, surgió una nueva interpretación del proceso darwinista desde el punto de vista del gen. Realmente, esta visión de la evolución actualizaba la vieja idea reduccionista propuesta por August Weissmann (1834-1914)¹⁰³ en la que se sostenía que los genomas eran supervivientes inmortales en la lucha por su permanencia, mientras que los organismos sólo constituían epifenómenos.

Inspirado en este panseleccionismo y en la denominada barrera de Weissmann, precursora del dogma central de la biología molecular¹⁰⁴, Richard Dawkins (1976) popularizó¹⁰⁵ una nueva forma de resolver el problema de las unidades de selección

¹⁰¹Tras los experimentos de Fred Griffith con neumococos en 1928, Avery, Macleod y McCarty indicaron que el ADN era la molécula responsable de la herencia. La evidencia definitiva fue presentada por Hershey y Chase en 1952. Finalmente, como es sabido, en 1953, Watson y Crick desvelaron la estructura del ADN gracias a los trabajos con rayos X de Rosalind Franklin.

¹⁰²e.g. AAA codifica la lisina, CCC codifica la prolina, etc. La hemoglobina, cuya función es captar y transportar el oxígeno en la sangre, es la primera proteína de la que se conoció su secuencia de aminoácidos (1952) y la estructura tridimensional (1960).

¹⁰³En *Das Keimplasma: Eine Theorie der Vererbung* de 1892 presentó su teoría panseleccionista.

¹⁰⁴Indica el sentido único de flujo de información desde el genotipo al fenotipo.

¹⁰⁵Esta idea fue adelantada por Georg C. Williams en su libro “Adaptation and Natural Selection” [1966;1992]. Además, Dawkins se basa también en los modelos matemáticos de W.D.Hamilton [1964] y R.I. Trivers [1971].

en relación con el comportamiento altruista en su obra *The Selfish Gene*. Presentado de forma esquemática, este autor defiende que la permanencia de los genes, garantizada mediante la copia generación tras generación, los convierte en las óptimas unidades de selección, mientras que los organismos en que residen son meros artefactos o subproductos perecederos -vehículos [Dawkins, 1976] o interactores [Hull, 1980]- que operan guiados por los intereses de los replicadores - genes (alelos) -.

G.C.Williams, uno de los ideólogos del darwinismo del gen, mantenía que

“La información puede proliferar y editarse mediante selección natural solamente si la selección afecta a la información en proporción mayor que los procesos competidores tales como la mutación y la deriva. Un paquete de información dado (código) tiene que proliferar más rápidamente que su variación para producir una genealogía reconocible [...]”[Williams, 1992, p. 13].

Pero el concepto de información no se utiliza exclusivamente con el significado de unidad de selección y de transmisión o replicación. También se ve asociado al producto histórico de la selección natural, ya que la evolución de una población muestra el proceso de “acumulación de información sobre su entorno” [Godfrey-Smith, 2014, p. 145]. Por eso, también el genoma de un organismo se concibe como el producto de la acumulación de la información del entorno tras el proceso iterativo de selección natural sufrido por una población durante generaciones. Ésta es la razón por la que se puede rastrear el cambio de la población mediante modelos que exploren las posibles vías de un dendograma [Williams, ib.,15]. De esta manera, se incorpora el enfoque informacional a la teoría de la unidad de tipo de Darwin.

En términos muy generales, el proceso de selección natural se asimila a un cierto tipo de algoritmo que relaciona progenitores y descendientes. Actúa sobre la información, entendida como entidades abstractas “tipo”, independientes de los objetos o casos que las ejemplifican (c.f. íd.). Esta forma de contemplar la relación entre el concepto de información y el darwinismo sugiere la posibilidad de extender este proceso de variación y selección a cualquier tipo de entidad. Incluso algunos académicos - e.g. Donald Campbell [1965], Daniel Dennett [1995], Henry Plotkin [1993], etc. - parecen abogar por una especie de monismo idealista de procesos, conocido como Darwinismo Universal o de forma más amplia Darwinismo Generalizado [Hodgson, G. et al., 2008], que estaría basado en dicho conjunto de algoritmos que explicarían cualquier cambio adaptativo. Sea como fuere, la copia, transmisión y acumulación de información se interpreta de manera análoga a los procesos de computación y transmisión de señales. Recordemos que esta relación con las ciencias de la computación no es casual, pues la idea de un proceso algorítmico se desarrollan en paralelo a los programas formales de evolución artificial como los algoritmos genéticos, inventado por John Holland a mediados de los años sesenta, y a las simulaciones de la evolución interactiva como el conocido modelo de biomorfos desarrollado por Dawkins y divulgado en su libro *El relojero ciego* [1986].

Un posible modelo muy idealizado de selección natural, como es la mencionada “dinámica del replicador”, podría expresarse de la siguiente manera para incorporar el concepto de información: (1) existe una población de entidades que muestran variación en la información, (2) ésta se copia o transfiere simultánea y fielmente - es decir, se reproduce o transmite asexualmente- en otras entidades, (3) aquella información que muestra ciertas características especiales se copia o prolifera más que otra que carece de ellas y (4) si la población se mantiene constante - ni entran ni salen entidades-, entonces la distribución de la información en la población cambiará.

Este modelo puede extenderse a ejemplos tomados de la “evolución cultural” conocida como “memética”. Como recuerda Godfrey-Smith [2009, p.149-ss.], ciertas variedades culturales o ideas como “los comportamientos, estados mentales o artefactos” [ib., 152] pueden constituirse en población darwiniana con capacidad de multiplicación. La reproducción se supone de tipo formal y no material, en el sentido de que para replicarse se utilizan otras entidades. En otros términos, se puede distinguir entre la componente material de la reproducción y la componente estructural [ib., 79]. La reproducción formal se relaciona con aquellas entidades que reproducen su estructura gracias a mecanismos y materiales exteriores. Así ocurre, por ejemplo, en el caso de los retrovirus, priones, etc [id.]. En consecuencia, la forma de lanzar una pelota de baloncesto se puede “heredar” gracias a que el comportamiento humano puede “reproducirse” por imitación en individuos distintos. Esta forma controvertida de entender el proceso evolutivo puede extrapolarse al caso extremo basado en una ontología sustancialista en la que se admitiría la separación entre la forma o tipo, entendida como información, y el sustrato material o caso.

En ejemplos como el precedente, es conveniente aclarar cuál es el significado del concepto de información según se presenta en las ciencias formales. Desde una perspectiva intuitiva de las matemáticas, la información está estrechamente relacionada con el resultado de procesos aleatorios y con el grado de incertidumbre: la cantidad de información se calcula en el marco de la resolución de un problema en una determinada situación. Su magnitud asociada puede medirse mediante la cantidad en la que se reduce la incertidumbre, (H_{t_i}) , en dos momentos distintos.

$$H_{t_1} - H_{t_2} = \text{Inf} \quad (2.9)$$

Es decir, obtenemos cierta cantidad de información cuando a la incertidumbre anterior a la acción le sustraemos la incertidumbre una vez implementada ésta. La noción clásica de incertidumbre descansa sobre la caracterización matemática del grado de concentración de la distribución de probabilidad¹⁰⁶.

¹⁰⁶Éste a su vez se deriva del principio de transferencia de probabilidad entre sucesos y la noción de mayorización: si tras una serie de transferencias, una distribución de probabilidad R se puede obtener a partir de una distribución de probabilidad T, se dice que T mayoriza a R ($T \prec R$). Seguimos ampliamente la exposición de [Uffink, 1990] en la que se sostiene que la mayorización entre distribuciones de probabilidad es la medida

Concretemos aún más el concepto: sea un experimento aleatorio, en el que tomamos un banco de pruebas y un conjunto fijo de posibles resultados con una distribución de probabilidad asociada, entonces, la cantidad de incertidumbre está relacionada con el grado de previsibilidad que presenta un experimento aleatorio merced a la distribución de probabilidad sobre los posibles resultados. La medida de incertidumbre es una medida de concentración de la distribución de probabilidad: si dicha distribución de probabilidad está concentrada en torno a un valor, el resultado del experimento es más predecible, lo que significa que la incertidumbre del posible resultado es menor. En caso contrario, la distribución de probabilidad se encuentra más dispersa y, en consecuencia, el resultado del experimento es menos predecible, lo que implica que la incertidumbre sobre el posible resultado es mayor.

Así pues, si medir la información se asocia a la comparación de distribuciones de probabilidad, entonces una interpretación de la dinámica darwinista análoga a un proceso de flujo de información, implicaría aproximarse a la idea de cambio evolutivo - entre ellos el debido a la selección natural- desde la comparación entre dos distribuciones de probabilidad, la de las propiedades de una población en el estado inicial y las del estado final. Dicho de otro modo, dadas las densidades de probabilidad de la población inicial y final, podemos obtener la información sobre los procesos que dieron lugar a ese cambio, o sea, los distintos tipos de “fuerzas” evolutivas [Frank, 2012b].

Por lo hasta aquí reflejado, parece evidente la necesidad de buscar una medida de información, relacionada con una medida de incertidumbre, que sirva para evaluar las fluctuaciones entre dos distribuciones de probabilidad. Desde el primer cuarto del siglo XX, se encuentran a nuestra disposición distintas medidas de información. Por ejemplo, Fisher [1922; 1950] caracterizó la información en el marco de la inferencia estadística, R. Hartley [1928] y C. Shannon [1948] desde la teoría de la comunicación, A. Kolmogorov [1965] y G. Chaitin [1966] bajo la visión algorítmica de la complejidad, A. Reyni [1961] dentro del problema de la estimación de la dimensión fractal, Devlin [1991] en términos de lógica, Stonier en el marco de la física como capacidad de organización de procesos, etc. Todos estos conceptos de información forman parte de una familia que muestra rasgos en común pero también diferencias importantes.

Una vez aclarada la existencia de distinto tipo de medidas de la información, la cuestión es elegir la que acomoda mejor para la configuración de un modelo matemático de la evolución. En la sección precedente se han expuesto las características esenciales del proceso de formalización y la relación que mantiene ésta con una explicación descriptiva del proceso de selección natural. El teorema de Price, que culmina el proceso de abstracción, considera de dos maneras distintas el papel de la dinámica evolutiva [Frank, 2012b]. Desde una perspectiva deductiva, el cálculo de los estados finales del proceso evolutivo se obtiene conocidas las reglas dinámicas y las condiciones del estado inicial de la población. Bajo

fundamental de incertidumbre. Como es una relación de pre-orden -transitiva y no antisimétrica, para aplicar la mayorización es válida cualquier función convexa.

la perspectiva inductiva, se tiene acceso a los datos de los valores iniciales y finales de la población y se pueden calcular mediante inferencia inductiva las reglas de la dinámica evolutiva [ib., 1007]. En consecuencia, un enfoque estadístico puede centrar el estudio evolutivo en la dependencia comparativa de los rasgos de las entidades que forman parte de las poblaciones. En general, como acabamos de señalar, las teorías matemáticas de la información son herramientas formales diseñada para comparar distribuciones de probabilidad.

S.A. Frank [2009; 2012 a,b, c; 2017] mantiene que la información de Fisher es la medida más acorde con el cambio evolutivo. La razón principal para optar por esta elección es que esta información constituye una métrica que relaciona directamente la medida de información con la dinámica del proceso. Esto se debe a que calcula las correlaciones entre dos distribuciones de probabilidad y a la vez interpreta la medida del “flujo de información” entre ellas en términos lagrangianos [Frieden, 2004]. Dicho de otra manera, en términos evolutivos, la información de Fisher no sólo mide las correlaciones debidas a la transferencia de información del entorno a la población sino que además aporta desvela el tipo de “fuerzas” responsables del cambio evolutivo. Esta doble función conduce a una generalización de la dinámica evolutiva equivalente a la ecuación de Price. De hecho, la maximización de la información de Fisher conduce al teorema fundamental de la selección natural.

Desde un punto de vista formal, como apuntamos más arriba, la ecuación de Price ($\Delta \bar{z} = \text{Cov}(w_i, z_i) + E_W(\Delta z_i)$) tiene dos términos, el primero representa la acción de la selección natural y, el segundo, el resto de los procesos que llevan al cambio evolutivo - especialmente los debidos al sesgo hereditario -. Esto es,

$$\Delta \bar{z} = \Delta_s \bar{z} + \Delta_E \bar{z} \quad (2.10)$$

Según Frank [2012a, pp. 1009-1010], si consideramos los casos en los que el término de transmisión por sesgo tiende a cero $\Delta_E \bar{z} \rightarrow 0$, el cambio debido a la selección natural toma la siguiente forma en función de la información de Fisher¹⁰⁷:

$$\Delta_s \bar{z} = \bar{\omega} \beta_{z\omega} \mathcal{F}(\Delta \vec{q}) \quad (2.11)$$

Es decir, el cambio intergeneracional en el valor medio del rasgo en una población ($\Delta_s \bar{z} = \bar{z}' - \bar{z}$) debido a la acción de la selección natural es proporcional: (1) a la eficacia relativa media ($\bar{\omega}$); (2) al coeficiente de correlación ($\beta_{z\omega}$), que es el término que refleja la dependencia lineal entre las dos distribuciones de probabilidad y, por tanto, sirve como medida de transferencia de información entre el entorno y la población; y (3) a la

¹⁰⁷Expondremos sus propiedades en el análisis final de este trabajo. Sea suficiente adelantar que según Fisher es “la cantidad de información que se espera obtener de cada observación realizada.” [1959, p.149]. Donde la esperanza está sujeta a cierto parámetro Θ que se debe estimar.

información de Fisher total (\mathcal{F}) estimada para el parámetro representado por la fluctuación de frecuencias ($\Delta\vec{q}$) expresada en forma vectorial.

Es muy importante resaltar que este patrón de cambio de frecuencias ($\Delta\vec{q}$) es muy sensible a la reordenación de datos, lo que condiciona los valores de la información de Fisher. En efecto, según [Frank 2012a, p. 1007-1009]¹⁰⁸, para el caso de que el rasgo coincida con la eficacia -teorema de la selección natural- la información de Fisher se puede expresar:

$$\mathcal{F}(\Delta\vec{q}) = \Delta\vec{q} \cdot \Delta\vec{q} \quad (2.12)$$

Si tomamos la fluctuación en frecuencias para cada población “i” como la diferencia de la fracción de los progenitores q_i con respecto a los valores correspondientes de la fracción de sus descendientes q'_i , podemos expresar la fluctuación de manera vectorial $\Delta\vec{q} = (\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n)$. Es evidente que si reordenamos los valores de las frecuencias $\{q_i, q'_i\}$, las componentes Δq_i del vector $\Delta\vec{q}$ cambiarán, lo que variará el producto escalar. Con otras palabras, al reordenar los datos habremos alterado la relación progenitor-descendiente que es clave para el proceso de selección natural.

La sensibilidad del vector fluctuación de frecuencias, y por tanto de la información de Fisher, frente al reordenamiento es crucial para entender uno de nuestros argumentos. En el último capítulo, veremos que la información de Fisher es una medida local. Es buena medida de selección porque capta con precisión las relaciones entre progenitor y descendiente.

¹⁰⁸Veamos el origen de este vector de cambio de frecuencias siguiendo ampliamente a [Frank 2012a, p. 1007-1009]. La ecuación de Price para el término de selección obtenida más arriba es: $\Delta_s \bar{z} = \frac{Cov(\omega_i, z_i)}{\bar{\omega}}$. Como es conocido, la covarianza se puede expresar como el producto escalar del cambio en la frecuencia, o fracción de entidades en la población, entre la población progenitora y la descendiente ($\Delta q_i = q'_i - q_i$) por el rasgo correspondiente (z_i) [ib., 1009], es decir: $\Delta \bar{z} = \sum (\Delta q_i) z_i$.

Comparando estas dos últimas ecuaciones: $\sum (\Delta q_i) z_i = \frac{Cov(\omega_i, z_i)}{\bar{\omega}}$.

Si tomamos la fluctuación en frecuencias como una lista de variaciones para cada entidad “i”, podemos expresar la fluctuación de manera vectorial $\Delta\vec{q} = (\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n)$. De igual modo para los rasgos $\vec{z}_i = (z_1, z_2, \dots, z_n)$. En esta nueva notación, la ecuación anterior toma forma vectorial: $\Delta\vec{q} \cdot \vec{z} = \frac{Cov(\omega_i, z_i)}{\bar{\omega}}$.

Si ponemos el término de la covarianza en función de la varianza por el coeficiente de correlación como en la ecuación (2.6) para el caso en que el rasgo es la eficacia, como en el teorema de Fisher, $z = \omega$, entonces: $\frac{Cov(\omega_i, z_i)}{\bar{\omega}} = \beta_{\omega z} \frac{Var(z)}{\bar{\omega}}$ y como $\beta_{\omega z} \frac{Var(z)}{\bar{\omega}} = \bar{\omega} Var(\frac{\omega}{\bar{\omega}})$, entonces, teniendo en cuenta que la varianza de la eficacia con respecto a la eficacia media equivale al producto escalar del vector que representa la fluctuación de frecuencias por sí mismo [Frank, 2012a, 1009], llegamos a: $Var(\frac{\omega}{\bar{\omega}}) = \Delta\vec{q} \cdot \Delta\vec{q}$.

Finalmente, comparando con la ecuación 2.11, tenemos la información de Fisher sobre dicha fluctuación [id.]: $\Delta\vec{q} \cdot \Delta\vec{q} = \mathcal{F}(\Delta\vec{q})$ CQD.

Conclusiones

En esta primera parte, se han presentado una síntesis histórica de los problemas principales sobre la variación y la extinción de especies cuya solución atendió a dos perspectivas: el fijismo y la transmutación. La conclusión más importante a la que se llegó es que, en época de Darwin, todos los naturalistas estaban de acuerdo en que existía variación pero no había consenso sobre cuales eran sus límites. Por otro lado, la extinción se debía a la falta de adaptación perfecta entre los individuos y el medio. Esto implicaba la existencia de la selección natural entendida en sentido negativo, como criba o muerte de los organismos que no se podían adaptar a los cambios del medio. En este marco se desarrolla la teorización de Darwin para solucionar el “misterio de los misterios”. Sumariamente el autor de esta tesis propone la siguiente taxonomía de acuerdo con la historiografía actual expuesta desde el apartado 1.2.2 al 1.2.5:

1. Antes de 1837, Darwin no es darwinista en el sentido moderno del término pues mantiene una posición fijista como la de la mayoría de sus coetáneos.
2. A mediados de 1837, la primera hipótesis de Darwin (1) contempla la transmutación. Especula con el transformismo de tipo saltacionista y considera que las especies se desarrollan y mueren siguiendo la hipótesis de Brocchi.
3. A principios de 1838, la segunda hipótesis de Darwin (2) donde la transmutación de las especies es de tipo gradual (transformación) y se produce cuando cambia el entorno mediante un efecto combinado de reproducción endogámica en situación de aislamiento sobre el que actúa la selección natural negativa, de tal suerte que se genera una descendencia con modificaciones de forma ramificada en la que se extinguen las especies intermedias. Darwin también incorpora la teoría de los caracteres adquiridos de Lamarck, que siempre estará presente con más o menos protagonismo.
4. Desde finales de 1838 y hasta mediados de los cincuenta, la tercera hipótesis de Darwin (3) aboga por el mecanismo de selección como fuerza directora principal: para satisfacer las condiciones mínimas de existencia, Darwin propone que el cambio gradual y la adaptación de las especies son fruto del principio de selección natural basado en el modelo maltusiano de lucha interespecífica actuando sobre las variaciones que se presentan al azar. Todavía no considera la competencia

intraespecífica de individuos y relega a un plano secundario los mecanismos de tipo lamarckiano.

5. La cuarta hipótesis transformista de Darwin (4) tendrá lugar a mediados de los años cincuenta, en torno a la publicación de la primera edición de *El origen de las especies* en 1859. Ahora la selección es la principal fuerza transformadora y se fundamenta en el modelo maltusiano de lucha por la existencia de los individuos bajo la influencia completa del medio físico y biológico local en el que se tiene en cuenta el éxito reproductivo. La adaptación del organismo es relativa, esto significa que unos individuos se enfrentan a las condiciones de existencia mejor que otros. La selección actúa continuamente sobre individuos que presentan variaciones aleatorias, en principio no dirigidos por el medio en el que se encuentran. Gracias a la reproducción y a la sucesión de generaciones, se produce una secuencia iterativa, prolongada durante largas escalas temporales, que lleva a la transmutación gradual y la adaptación de las especies. Darwin sostiene que el proceso de selección natural es la principal fuerza creadora. La presencia de otros mecanismos evolutivos ejercen influencias mucho menores y se plantean como respuesta al desconocimiento del origen de los mecanismos de la variación y de la herencia.
6. La quinta y última hipótesis de Darwin (5) se encuentra parcialmente en la sexta edición de “El Origen de las Especies” y, plenamente, en su libro “El Origen del Hombre” (1871). En estas dos obras, Darwin se abre a la posibilidad del pluralismo ontológico tanto de la unidad de selección - el individuo o el grupo- como del mecanismo causal - uso y desuso de las partes, selección sexual, selección familiar, variación dirigida y variación correlacionada-. En otros términos, disminuye la preponderancia del mecanismo de selección como papel director de la transformación de las especies.

En lo que se refiere a la metodología desplegada por Darwin, se caracteriza por la conjunción de las dos metodologías más aceptadas en la época: la doctrina de la causa verdadera de John Herschel y la teoría de la confluencia de William Whewell. Para dotar de contenido empírico a la teoría, Darwin no dudó en proponer distintas analogías como la comparación con la cría en cautividad. En este sentido, las analogías con la economía política y la mecánica newtoniana fueron esenciales para constituir al individuo como fundamento ontológico de la evolución.

Gracias a estas aclaraciones, se puede dar cuenta de la especificidad de la explicación darwinista, que se acomoda a las exigencias de las leyes *ceteris paribus*, y de la estructura hipotético deductiva del argumento de Darwin con extensión inductiva. Concretamente, se han diferenciado dos tipos de *explananda*, un principio de selección natural (PSN) sincrónico - que explicaría (1) la dinámica de las frecuencias o el cambio de los rasgos en una población entre dos generaciones, (2) la composición de una población en un punto particular del tiempo y (3) la supervivencia de un individuo, su éxito reproductivo y su existencia - y la

teoría de la evolución por selección natural (TSN), que aplicaría el PSN de manera iterada para establecer una explicación de tipo diacrónico del (1) origen de rasgos en una población, de su distribución y estabilidad y (2) del rasgo particular que posee actualmente cada individuo.

Uno de los debates abiertos más importantes para el desarrollo de esta tesis es el relacionado con el poder creativo de la selección natural. Dos versiones han sido contrastadas, una mantiene que la selección es un mero tamiz y, por lo tanto, un proceso de carácter esencialmente negativo. La contraria afirma que la selección natural darwiniana es esencialmente creativa. Se han ofrecido dos tipos de argumentos que defienden esta última posición: (1) si la selección se puede resumir en una secuencia de dos pasos, variación y selección, entonces la aplicación del PSN de manera iterativa hace más probable la aparición de ciertos rasgos con valor adaptativo que una única variación y (2) algunos autores afirman que la selección no sólo constituye el primer paso, sino que en cierta manera participaría en la creación de variación. Como vimos, el problema parece disolverse bajo el punto de vista estadístico de la genética de poblaciones.

Esta disciplina ha constituido el primer hito en la matematización de la selección natural y ha supuesto a la vez un vuelco en cuestiones epistemológicas y metodológicas. Por un lado, ha dejado en un segundo plano las explicaciones causales al separar las nociones de agencia y de contabilidad, tornando la atención al punto de vista estadístico. Este enfoque ha favorecido la elaboración de modelos matemáticos y computacionales y la elaboración de sumarios. En este sentido, las recetas que resumen la selección natural darwiniana son fruto de un alto poder de abstracción, uno de cuyos ejemplos lo constituye el teorema de Price. En él se pueden diferenciar los términos asociados a la selección natural (PSN) de otras causas de cambio derivadas del sesgo hereditario.

Esta ecuación puede ser interpretada de maneras distintas, pues sus términos no dependen: (1) de la naturaleza de las entidades, (2) del tipo de reproducción y la transmisión hereditaria y (3) de si la variación de los rasgos es discreta -como en el caso que hemos presentado- o continua.

Como indicamos, el valor epistémico de esta relación no se encuentra en su capacidad predictiva, pues su contenido empírico descansa en los modelos particulares, sino en facilitar una explicación mediante unificación [Kitcher, 1989, pp. 436 y ss.], al modo de la segunda ley de la dinámica. Además, no explicita relaciones causales sino correlaciones estadísticas. Sólo la interpretación puede facilitar la posibilidad de establecer una explicación causal en modelos concretos.

El teorema de Price considera de dos maneras distintas el papel de la dinámica evolutiva [Frank, 2012a]. En la perspectiva deductiva, las reglas dinámicas son conocidas y junto a las condiciones iniciales de la población pueden calcularse los estados finales. Bajo la perspectiva inductiva, se tiene acceso a los valores iniciales y finales y se pueden calcular mediante inferencia inductiva las reglas de la dinámica evolutiva [ib., 1007]. Así pues, la perspectiva estadística puede centrar el estudio evolutivo en la dependencia comparativa

de los rasgos de las entidades que forman parte de las poblaciones. Es más, la ecuación de Price goza de las propiedades de invariancia y simetría lo que, sin duda, hace más sencilla la aproximación al proceso evolutivo desde las teorías de la información [ib., 1009].

Recientemente se ha incorporado un concepto de información con sentidos diversos. Entre ellos, se pueden destacar dos: uno relacionado con el principio sincrónico de selección natural PSN - h.e. la unidad de selección , transmisión o replicación - y, otro con el diacrónico (TSN) - h.e. la capacidad de acumulación de información sobre el entorno -.

Algunos autores mantienen que la dinámica darwinista puede representarse mediante un algoritmo o conjunto de algoritmos informacionales. Como se ha visto, gracias a una transformación de notaciones, el esquema darwinista emplea la información de Fisher para desvelar la fuerza responsable del cambio evolutivo y, en especial, la acción de la selección natural. La formulación del proceso evolutivo en términos de información favorece la aplicación analógica de la dinámica evolutiva a diversas disciplinas. En este sentido, el Darwinismo Cuántico, objeto del presente estudio, tal vez podría constituir un ejemplo paradigmático de dinámica darwinista.

Parte II

EL PROBLEMA: LA TRANSICIÓN DEL MUNDO CUÁNTICO AL CLÁSICO

Introducción

La analogía de tipo darwinista pretende resolver uno de los problemas más acuciantes de la física actual, a saber, la interpretación de la teoría cuántica. En esta parte, se expondrán los puntos esenciales del problema mediante una estructura que haga comprensible el programa del Darwinismo Cuántico.

Como es bien sabido, los físicos del primer cuarto del siglo XX crearon la mecánica cuántica para dar cuenta del resultado de algunos experimentos que no podían explicarse con las teorías físicas disponibles en aquel momento¹⁰⁹. El denominador común que comparten dichos experimentos es el problema de la interacción radiación-materia. Por esta razón, la descripción microscópica de la materia y la naturaleza de la luz fueron el centro de los modelos y teorías que, junto a un intenso trabajo experimental, sirvieron de fundamento a la nueva física.

A pesar de su maravilloso éxito predictivo, la teoría cuántica no era intuitiva a la manera de la física clásica y conducía a paradojas o fenómenos que no se acomodaban a la intuición, tales como la aparición de discontinuidad en la naturaleza o el comportamiento dual -ondulatorio y corpuscular - tanto de la materia como de la radiación. Lo cierto es que, una vez fijado el formalismo matemático, nació una fuerte controversia sobre su interpretación.

El problema fundamental de la teoría cuántica reside en la desconexión entre el formalismo y la experiencia ordinaria. En efecto, el espacio matemático en el que se representa la teoría es de muchas -incluso infinitas- dimensiones. Las propiedades de los sistemas físicos se especifican mediante una función de ondas sin aparente referencia entre las entidades que pueblan la estructura espaciotemporal tridimensional¹¹⁰ del mundo clásico.

Antes de poder abordar este problema, parece lógico intentar clarificar el concepto “interpretación de una teoría”. A esta tarea se presta el capítulo 3.1. En él se presentarán los tres enfoques principales bajo los que se analiza la naturaleza de las teorías y su relación con los modelos, aunque centraremos el análisis en la concepción pragmática. De este

¹⁰⁹El espectro de emisión de radiación de un cuerpo en equilibrio termodinámico, la intensidad de la corriente surgida de la interacción entre la luz y los conductores eléctricos (efecto fotoeléctrico), las líneas espectrales de emisión y absorción de los átomos y la capacidad calorífica de los cuerpos, constituye una lista representativa de los principales problemas que no pudieron resolver la electrodinámica de Maxwell, la termodinámica y la mecánica estadística de Boltzman, etc.

¹¹⁰Tetradimensional si consideramos el caso relativista.

estudio, se derivarán los distintos significados atribuibles al concepto de interpretación y el estrecho vínculo que mantiene con los objetivos epistémicos últimos del quehacer científico: la explicación y la comprensión .

Seguidamente, se expondrá el problema de interpretación de la teoría cuántica. Una interpretación adecuada debería evidenciar los principios bajo los que se puede derivar el formalismo cuántico y resolver las denominadas paradojas cuánticas. La dificultad que afronta cualquier interpretación estriba en que estos hechos, contrarios a la intuición o a la lógica, son consecuencia de tres problemas¹¹¹ interconectados, a saber: el entrelazamiento - con implicaciones importantes sobre la localidad y la separabilidad de los sistemas cuánticos -, la naturaleza de la probabilidad - h.e. su carácter epistémológico u ontológico - y el papel y la naturaleza del proceso de medida.

Esta última cuestión se abordará en el capítulo (3). Se empezará por estudiar su estructura que consideraremos dividida en dos partes: el formalismo cuántico y el algoritmo que dota de contenido empírico a la teoría. Las distintas interpretaciones de la teoría¹¹² están relacionadas con las diferencias entre las distintas realizaciones particulares de el citado algoritmo.

Veremos que la versión actual del problema de la medida se puede descomponer en dos: el denominado pequeño problema de la medida, que debe contestar a dos interrogantes: uno está relacionado por la selección de las bases que finalmente serán las candidatas a representar las propiedades de los estados clásicos y, la segunda cuestión, deberá explicar cuál es la razón por la que no es posible observar el fenómeno de las interferencias cuánticas.

El programa de decoherencia, al que dedicaremos el capítulo (4), intenta contestar a estas dos cuestiones mediante el estudio de la mecánica cuántica en sistemas abiertos. Es decir, aquellos casos no idealizados en que el sistema bajo estudio no se encuentra aislado sino en interacción con el entorno. La decoherencia así entendida es un mecanismo físico independiente de toda interpretación. Sería el responsable de resolver el problema ontológico, h.e. tanto la selección de la base preferente, como de la deslocalización de las correlaciones cuánticas en el entorno y la consecuente caída de las interferencias cuánticas. La representación matemática del citado mecanismo debe establecer criterios formales de selección de los posibles estados clásicos y una descripción detallada de los distintos modelos en los que la dinámica cuántica pierde su carácter lineal. La representación de la teoría cuántica en el espacio de las fases garantiza una posible visualización e inteligibilidad del fenómeno de la decoherencia más aparente que real.

¹¹¹Desde una postura realista cabría decir que lo que debe fijar una teoría física es el tipo de entidades que pueblan el mundo y la dinámica que gobierna su movimiento. Desde este punto de vista, si la información completa del estado del sistema se encuentra en la función de onda, entonces la teoría debería decir qué tipo de entidad o cuál es su participación en la dinámica. Este sería el denominado “problema ontológico”, que está relacionado con los expuestos en el texto principal.

¹¹²Entendemos interpretaciones en sentido propio de la teoría de la ciencia, ya que existen diferentes formulaciones de la teoría que son empíricamente adecuadas como la mecánica cuántica bohmiana, la interpretación GRW, etc.

Capítulo 3

La interpretación de la teoría cuántica

3.1. ¿Qué es una teoría?

El estudio de la naturaleza de las teorías se puede abordar desde tres enfoques: el sintáctico, el semántico y el pragmático.

Como es bien sabido, para la concepción sintáctica, las teorías son entidades lingüísticas caracterizadas por un conjunto de enunciados: se entienden como un cálculo interpretado mediante modelos. Esta teoría de la ciencia diferencia claramente entre el modelo y la teoría. Por ejemplo, en la concepción de Tarski las teorías están formadas por un conjunto de sentencias donde el papel del modelo, denominado modelo de la teoría T , es “una posible realización en la que todas las sentencias válidas de una teoría T se satisfacen” [Morrison, M. 2016].

Para subsanar las deficiencias del modelo sintáctico¹¹³ y como alternativa, surgió la denominada concepción semántica que confirió a los modelos un papel central en la estructura de las teorías. En sus distintas versiones, este enfoque filosófico defiende que una teoría está formada por una clase de modelos teóricos abstractos, construidos a partir de leyes o principios generales, con los que se persigue explicar los fenómenos empíricos de tal suerte que se subsuman los sistemas que conforman los fenómenos en los citados modelos. Esta relación entre modelos empíricos y modelos abstractos, se puede describir mediante enunciados a los que es lícito asignar valores de verdad o falsedad. Estas aserciones empíricas se pueden explicitar en diferentes lenguajes sin que por ello se privilegie ninguna representación lingüística [van Fraassen, 1996].

¹¹³ Como es bien sabido, la concepción sintáctica presenta graves problemas como los derivados del significado de las reglas de correspondencia y la distinción teórico-observacional, la posibilidad de que una misma teoría sea axiomatizada de diversas formas - lo que significaría multiplicar el número de teorías distintas -, el papel que juega el lenguaje en el que se formaliza la teoría, la incapacidad de distinguir la intencionalidad de los modelos, etc.

Para el enfoque estructuralista la relación de los modelos con el mundo fenoménico, o sea la interpretación, se establecería mediante una jerarquización de modelos [Winther, 2016, p. 25].

En el caso de la concepción del espacio de estados de Van Fraassen, una interpretación de la teoría se establece mediante un isomorfismo entre los fenómenos - estructuras descritas gracias a los modelos experimentales y los resultados- y las subestructuras empíricas subsumidas en los modelos teóricos. De esta forma, se puede fijar la pregunta sobre la interpretación de la siguiente forma: ¿ cómo podría ser el mundo según la teoría? [van Fraassen, 1991, p.9].

Finalmente, en el enfoque cognitivo de Giere [1988, 2010] la relación de semejanza constituye la clave de la interpretación de la teoría. La forma en que la semejanza relaciona los modelos¹¹⁴ con el mundo no se establece a priori sino que encuentra mediador en los agentes conscientes que “utilizan los modelos para representar las cosas” [Giere, 1988, p. 127]. Así pues, en última instancia, las teorías científicas se constituyen gracias al consenso de la comunidad de científicos.

Tanto la concepción sintáctica como la semántica no son capaces de esclarecer cuál es el papel mediador de los modelos en la práctica científica y cómo proporcionan conocimiento [Morgan y Morrison, 1999, p.8]. En la primera nos encontramos con problemas a la hora de establecer la distinción entre modelo y mundo y, en la segunda, entre teoría y modelo . En efecto, siguiendo el argumento de Suárez [1999, 168-196], si se asigna al modelo una función semántica, como en el caso de la concepción sintáctica, el mundo es sólo uno de los posibles modelos, aquél que convierte a la teoría en verdadera y, por lo tanto, no hay diferencia entre modelo y mundo. Por otro lado, en la concepción semántica no hay prácticamente lugar para diferenciar las teorías de los conjuntos de modelos. Sin embargo, como demuestra la práctica científica - e.g. el primer modelo de superconductividad en la mecánica cuántica [Suárez, 2009]-, al contrario de lo supuesto por la concepción semántica, no puede reducirse la naturaleza de los modelos a los imperativos de las teorías, ya que la adecuación empírica frecuentemente requiere de información que no se encuentra en ellas pero queda recogida en los modelos.

De estos argumentos se concluye que si una de las tareas principales de la ciencia es construir modelos y los que encontramos en la práctica científica no han sido elaborados mediante recetas procedentes de la teoría, entonces los modelos son entidades parcialmente independientes tanto de las teorías como del mundo. Como sostienen algunos partidarios de la concepción pragmática, las teorías vendrían a ser estructuras abstractas que no mantienen necesariamente relación con la realidad. Los modelos cubrirían esa falta de conexión [Cartwright, 1983, p.159]. Si no fuera así, no podrían desplegar la mediación como complementos necesarios para que la teoría se pudiera adaptar a casos particulares o no

¹¹⁴Para Giere [1988], los modelos teóricos son modelos que representan algo en el mundo (e.g. un péndulo, que puede quedar definido mediante su ecuación dinámica correspondiente). No obstante este autor entiende el concepto de modelo teórico de forma muy general. Para más información, consultar, [Giere, 1988, p. 125].

sustituirían a las teorías en los casos en que su aplicación es muy compleja o, simplemente, no constituirían una primera tentativa para resolver problemas que se encuentran en el límite del conocimiento [Morgan y Morrison, 1999, p.10].

Como se verá en apartados siguientes, la labor de mediación entre la teoría y el mundo atribuida a los modelos ha reforzado la idea, que contaba ya con una ilustre tradición tanto entre filósofos como entre científicos, del papel fundamental que juega la modelización en las ciencias. Esta tarea requiere de un estudio detallado de las estrategias para construir modelos - sirva como ejemplo el razonamiento analógico o metafórico - y se debe tener en cuenta la naturaleza y la función de los materiales utilizados para su elaboración como imágenes, maquetas, programas, diagramas etc. [Suárez, 2016, p.441]. Como se puede apreciar, la modelización no sólo requiere de una entidad como modelo de una parte del mundo bajo estudio, también es necesario tener en cuenta los propósitos del sujeto al establecer esa relación y el contexto en el que tiene lugar. De hecho, según [Suárez y Cartwright, 2008], nuestro conocimiento “teórico” se encuentra distribuido no sólo en las fórmulas y en las descripciones, sino también en los montajes y aparatos de laboratorio, en las técnicas experimentales y en las aplicaciones. Por este motivo, no parece tener sentido el intentar buscar un único criterio para asignar una interpretación a las teorías. Así mismo, la bondad de una teoría no quedaría reducida a su capacidad predictiva ni explicativa sino que vendría también caracterizada por criterios pragmáticos tales como la utilidad y la productividad [Winther, 2016, p.45].

3.2. El experimento de Stern-Gerlach

El experimento de Stern-Gerlach [1922] mostró de forma directa la naturaleza de los nuevos fenómenos cuánticos y dejó en evidencia la incapacidad predictiva y explicativa de la física clásica. Demostró el carácter discreto, o cuantización, del momento angular magnético intrínseco de los átomos¹¹⁵. La aplicación de las reglas de la mecánica cuántica, que incorpora la posibilidad de la existencia de los estados de superposición de distintos momentos magnéticos, ofrece soluciones con un grado de exactitud y precisión inusitado. No obstante, como se ha apuntado, este éxito predictivo no excluye la aparición de graves problemas formales y conceptuales que afectan a la comprensión de los fenómenos físicos y, en última instancia, a la concepción del mundo inspirada por la nueva teoría .

Consideremos el montaje experimental de Stern-Gerlach (fig.3.1) en el que una fuente emite átomos del mismo elemento que se propagan en la dirección del eje \mathcal{Y} pasando a través de dos diafragmas colimadores y un campo magnético fuertemente inhomogéneo, creado por un electroimán cuyo eje está colocado en la dirección \mathcal{Z} .

Si cada átomo se considera como dipolo magnético clásico¹¹⁶ y los dipolos atómicos

¹¹⁵El experimento se realizó con átomos neutros de plata.

¹¹⁶Recordemos que, para la física clásica, si las cargas negativas se mueven en trayectoria cerrada, se crea, en dirección perpendicular al plano donde reposa el lazo, un momento magnético según la corriente por unidad

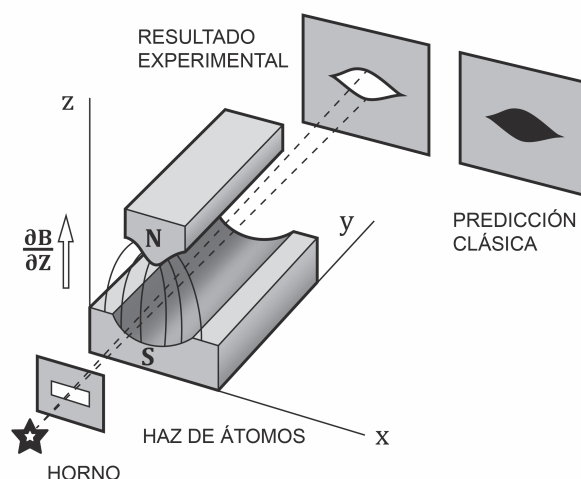


Figura 3.1: Diagrama del experimento de Stern-Gerlach [1922]. La variación del campo magnético B fuertemente inhomogéneo $\frac{\partial B}{\partial z}$ en la dirección del eje z perturba la trayectoria de los átomos. En contra de la previsión clásica, aparecen dos zonas de impacto netamente separadas. Adaptada de la placa conmemorativa de la Universidad de Frankfurt.

tienen inicialmente las orientaciones distribuidas de manera aleatoria¹¹⁷, el acoplamiento del campo magnético fuertemente inhomogéneo con los momentos magnéticos de los átomos, ejercerá una fuerza neta -pues será mayor en uno de los extremos del dipolo que en el otro- que desviará la trayectoria de los átomos.

En contra de la predicción de la electrodinámica clásica - una línea continua de impactos entre dos extremos dependientes del ángulo entre el momento magnético del átomo y el del campo magnético generado por el electroimán-, comprobamos que sólo aparecen dos zonas de impacto¹¹⁸ opuestas en la pantalla, en la dirección marcada por la orientación del campo magnético inhomogéneo, que corresponderán a dos estados magnéticos distintos posibles¹¹⁹.

Este experimento constituye la primera evidencia directa de la cuantización espacial¹²⁰. Se quiebra así uno de los principios básicos de la física clásica: el principio de continuidad. Como es bien conocido, éste no es el único fenómeno que rompe con el marco de descripción clásico. Uno de los más relevantes es el comportamiento no local y no separable de los sistemas cuánticos. Explicar y predecir este tipo de resultados experimentales hicieron necesaria la formulación de una nueva teoría física.

de área encerrada dicho el lazo. La contribución de todos los momentos magnéticos constituye el momento magnético total del átomo. Para más información, consultar [Feynman, 1963, vol.III].

¹¹⁷La fuente es un hornillo a cierta temperatura lo que garantiza, en principio, que las orientaciones magnéticas de los átomos sean aleatorias.

¹¹⁸Con algunos átomos como el níquel, hierro, el cobalto, etc. el espectro sobre la placa es más complejo.

¹¹⁹Estos momentos magnéticos se pueden medir con este montaje experimental y se denominan magnetón de Bohr.

¹²⁰Otros experimentos, ya sean de variación espacial -como la famosa doble rendija- o temporal-interferometría Ramsey- evidencian de forma indirecta la superposición.

3.3. La estructura de la nueva física

Siguiendo la orientación de la primera sección de este capítulo¹²¹, describiremos la estructura de la teoría cuántica apoyada en dos pilares fundamentales: el formalismo básico (la teoría) y un algoritmo (el modelo) que concreta el contenido empírico de la teoría.

El formalismo básico lo constituyen tres principios:

- 1.- **Principio de superposición o completud:** a todo sistema físico le corresponde una representación matemática en un espacio de Hilbert \mathcal{H} complejo y separable que forma el espacio de estados de la mecánica cuántica. A cada estado del sistema del que tenemos la máxima información o puro¹²² se le asocia un rayo unidad¹²³ $|\Psi\rangle_R$ cuyos elementos se denominan vectores de estado.

La consecuencia más importante del postulado de completud es el *principio de superposición*: cualquier superposición lineal de vectores de estado puros, que pertenecen a un espacio de Hilbert \mathcal{H} , es también estado puro del sistema bajo ciertas condiciones generales¹²⁴.

Es importante señalar que la superposición cuántica no tiene análogo clásico. La superposición es inherente a la estructura de un espacio de Hilbert complejo y separable, por lo que no encuentra una representación en el espacio tridimensional de la experiencia ordinaria. En especial, no se puede interpretar al modo de las ondas clásicas en las que cada componente de la superposición se encuentra en localizaciones diferentes. La característica diferenciadora reside en la coherencia o capacidad de que interfieran mutuamente las distintas componentes de la superposición (autointerferencia).

- 2.- **Principio de evolución lineal:** la evolución del estado es lineal, unitaria, determinista, continua y queda especificada por el hamiltoniano de interacción.
- 3.- **Principio de composición de sistemas :** el estado que representa un conjunto de sistemas cuánticos en interacción es el producto tensorial del espacio de estados de sus componentes.

Una vez presentado el núcleo de la teoría, se puede aplicar a la resolución del experimento de Stern-Gerlach (SGz). Para que no se produzcan confusiones en lo que sigue,

¹²¹Aunque la estructura de la teoría se puede presentar de muchas maneras, se ha seleccionado ésta por conveniencia respecto al esquema que sigue el programa de decoherencia y de Darwinismo Cuántico.

¹²²Como veremos, si se ha fijado un conjunto completo de observables que conmutan, esto es, que son compatibles y por lo tanto su conjunto de autovectores forma base ortonormal única salvo fase, entonces se dice que se tiene máxima información del sistema o estado puro.

¹²³Los posibles estados del sistema son una clase de equivalencia de vectores normalizados bajo transformaciones de fase.

¹²⁴No todos los rayos en \mathcal{H} representan un estado físico realizable. Las denominadas reglas de superselección limitan la capacidad de representación del formalismo matemático. Por lo tanto, dichas reglas son una componente esencial para satisfacer el contenido empírico [Galindo y Pascual, 1989, p. 121].

consideramos que el sistema cuántico no serán átomos sino electrones, de tal manera que la propiedad magnética del átomo se reemplazará por el espín electrónico¹²⁵.

La representación matemática del espín electrónico, que según la teoría obedece al principio de superposición o completud, viene dada por un rayo en el espacio de Hilbert y, que sin pérdida de generalidad, la denominaremos vector de estado.

Los electrones que salen disparados del hornillo pueden tener cualquier orientación de espín. Como hemos visto en la sección anterior, tras pasar el campo magnético inhomogéneo de un primer dispositivo Stern-Gerlach en dirección \mathcal{Z} (SGz1) a los electrones que dejan marcas en la parte superior les asignamos la representación del estado de espín¹²⁶ $|z_{\uparrow}\rangle$ y a los que dejan rastro en la parte inferior $|z_{\downarrow}\rangle$.

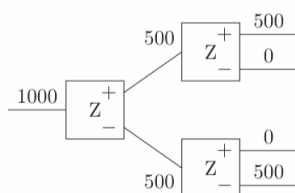


Figura 3.2: Preparación de espín electrónico en la dirección del eje Z.

Si retiramos la pantalla de registro y colocamos un segundo (SGz2) orientado según \mathcal{Z} en la trayectoria seguida en la parte superior, encontraremos que una pantalla posterior al segundo (SGz2) registrará el 100% de los estados arriba $|z_{\uparrow}\rangle$. En este caso decimos que el primer aparato de (SGz1) es una preparación del estado para $|z_{\uparrow}\rangle$. Es decir, la interacción de (SGz1) con el electrón no es propiamente una medida de la propiedad de espín, pues no se ha registrado la marca superior en la pantalla¹²⁷. En el caso de que coloquemos el segundo (SGz2) en la trayectoria del electrón que viajó hacia abajo, la totalidad de los electrones de esa trayectoria impactarán en la zona inferior.

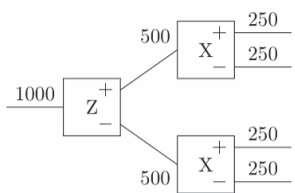


Figura 3.3: Preparación de espín electrónico en la dirección del eje Z.

¹²⁵Recordemos que en los átomos los electrones generan el momento magnético derivado de su movimiento orbital, pero que la nueva mecánica debe incluir el momento magnético de espín. Es una propiedad exclusivamente cuántica, aunque, para intentar comprenderlo, podemos utilizar la analogía siguiente: si el electrón rota alrededor de sí mismo, generará un momento angular, pero también un momento magnético. Este momento magnético intrínseco cuántico es el denominado “espín” electrónico.

¹²⁶Técnicamente un vector bicomponente denominado *spinor*. En los casos siguientes serían $|z_{\uparrow}\rangle$ correspondería a $|\psi\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ y $|z_{\downarrow}\rangle$ correspondería a $|\psi\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$.

¹²⁷Este tipo de medida se conoce como *medida ideal*.

De la misma forma, si tras la salida de uno de los haces procedentes del primer Stern-Gerlach (SG1z) colocamos otro Stern-Gerlach cuyo campo magnético se encuentre orientado en la dirección \mathcal{X} (SG2x), los estados de espín a la salida que representan a estos electrones han quedado preparados en el estado descrito en la base $[|x_{\uparrow}\rangle, |x_{\downarrow}\rangle]$. La mitad en la dirección arriba y la mitad en la dirección abajo.

Si ahora giramos suavemente la orientación del segundo Stern-Gerlach orientado en dirección \mathcal{X} (SGx2) hacia la dirección \mathcal{Z} del primer (SGz1): comprobaremos cómo las proporciones de los impactos (arriba-abajo) varían desde el 50 % al 100 %, momento en que los dos electroimanes tienen la misma orientación como en el primer caso descrito.

En general, enviamos un electrón con momento de espín desconocido a un dispositivo SG cuyo eje reposa en la dirección \mathcal{Z} (SGz3), según el principio de superposición, el estado de espín electrónico se pueden representar por la superposición de estados según la base $[|z_{\uparrow}\rangle, |z_{\downarrow}\rangle]$:

$$|\psi_0\rangle = \alpha|z_{\uparrow}\rangle + \beta|z_{\downarrow}\rangle \quad (3.1)$$

donde, en general, las amplitudes o coeficientes α y β , son números complejos y cumplen la condición de normalización $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

Así pues, $\{|\psi_0\rangle, |z_{\uparrow}\rangle$ y $|z_{\downarrow}\rangle\}$ representan tres posibles preparaciones de los espines atómicos.

Seguidamente, se aplicará la teoría a la interacción de los electrones con el dispositivo de medida que se considera también un sistema cuántico¹²⁸. El aparato de medida registra los resultados mediante un puntero o aguja con tres posiciones: antes de la medida o preparado y dos resultados finales: orientaciones arriba y abajo. Cada posición viene representada por el correspondiente estado macroscópico¹²⁹: el anterior a la interacción $|a_p\rangle$ y los dos correspondientes a los posibles resultados $|a_{\uparrow}\rangle$ y $|a_{\downarrow}\rangle$.

Si aplicamos el formalismo, según el principio de evolución lineal (U) y el de composición de sistemas (\otimes), una vez ocurrida la interacción, la evolución del sistema para los electrones cuyo espín se preparó en el estado $|z_{\uparrow}\rangle$ será:

$$|z_{\uparrow}\rangle \otimes |a_p\rangle \rightarrow U(|z_{\uparrow}\rangle \otimes |a_p\rangle) = |z_{\uparrow}\rangle \otimes |a_{\uparrow}\rangle$$

para aquellos cuyo espín se represente por $|z_{\downarrow}\rangle$, será:

¹²⁸La interacción entre el momento magnético de electrón y el SG se representa dentro del hamiltoniano mediante el producto del espinor con el campo magnético: $-\frac{e}{m}(\frac{\hbar}{2}\vec{\sigma} \cdot \vec{B})$.

¹²⁹El SG no es un buen ejemplo de dispositivo de medida pues el registro se lleva a cabo en la pantalla. Es decir, las propiedad medida es la posición. Por tanto, si representamos los estados de la posición mediante la función de onda perteneciente al espacio de Hilbert $L^2(\mathbb{R})^N$ -recordemos que la función de onda representa la amplitud de que un sistema se encuentre en posición determinada $\psi(x)$ -, el estado total es el producto tensorial del espacio de Hilbert asociado a la función de onda y el del spnior $|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \psi_+ \\ \psi_- \end{pmatrix}$ y la función de onda se representará mediante $\psi(x; z)$. En nuestra notación: $|z_{\uparrow}\rangle |\uparrow\rangle$. Con estas reservas, entenderemos que la representación impacto superior o inferior indican orientación del espín arriba y abajo (la posición del puntero en la pantalla) y que no existe degeneración.

$$|z_{\downarrow}\rangle \otimes |a_p\rangle \rightarrow U(|z_{\downarrow}\rangle \otimes |a_p\rangle) = |z_{\downarrow}\rangle \otimes |a_{\downarrow}\rangle$$

Estas dos ecuaciones explicitan que el estado del aparato ha pasado a registrar que el espín se dirigía hacia arriba en el primer caso y hacia abajo en el segundo.

Si realizamos la misma operación con el espín preparado en el estado de superposición inicial $|\psi_0\rangle = \alpha|z_{\uparrow}\rangle + \beta|z_{\downarrow}\rangle$, evolucionará según:

$$|\psi_0\rangle \otimes |a_p\rangle \rightarrow U(\alpha|z_{\uparrow}\rangle \otimes |a_p\rangle + \beta|z_{\downarrow}\rangle \otimes |a_p\rangle)$$

y debido a la linealidad de U :

$$|\psi_0\rangle \otimes |a_p\rangle \rightarrow |\psi_f\rangle = \alpha|z_{\uparrow}\rangle \otimes |a_{\uparrow}\rangle + \beta|z_{\downarrow}\rangle \otimes |a_{\downarrow}\rangle$$

Tras la interacción entre el electrón y el aparato, el estado puro inicial se ha transformado en un estado puro final representado por una superposición de productos tensoriales de vectores, que no pueden asignarse ni al electrón ni al aparato.

$$|\psi_f\rangle = \alpha|z_{\uparrow}\rangle \otimes |a_{\uparrow}\rangle + \beta|z_{\downarrow}\rangle \otimes |a_{\downarrow}\rangle \quad (3.2)$$

Esta representación ejemplifica lo que se conoce como estado cuántico entrelazado o enredado y es fruto de la interacción de dos sistemas cuánticos. El estado resultado tras aplicar los principios de la teoría no se encuentra bien definido: es una superposición de estados macroscópicos. Es más, cualquier estado de un sistema que interaccionara con los anteriores para encontrar un estado definido quedaría enredado en una cadena cuyo límite incluiría al universo al completo.

Ésta es una de las maneras tradicionales de presentar el problema de la medida: si consideramos los sistemas físicos en términos del formalismo de la mecánica cuántica, los principios de superposición, evolución lineal y composición de sistemas conducen a la indefinición de los estados macroscópicos. Este resultado se encuentra fuera de toda evidencia experimental. En efecto, no se han observado estados de superposición en la naturaleza donde los punteros de las medidas no tengan el estado bien definido, en palabras de Schrödinger:

“Es típico de estos casos que una indeterminación originalmente restringida al dominio atómico se transforme en una indeterminación macroscópica que puede entonces resolverse por observación directa. Eso nos impide aceptar ingenuamente como válido un ‘modelo borroso’ para representar la realidad.”
[Schrödinger, 1935, p. 812].

Si se desea particularizar el estado del sistema para encontrar resultados bien definidos, se debe aplicar un modelo de medida como el siguiente algoritmo tomado de [Wallace, 2008, 16-22] :

1. Identificación de las variables dinámicas del sistema, por ejemplo posición y momento del centro de masa del puntero, que vendrán representados por los operadores autoadjuntos correspondientes.
2. Separación del espacio de Hilbert en los subespacios componentes macro y micro $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{micro} \otimes \mathcal{H}_{macro}$.
3. Selección de los estados macro posibles - e.g. paquetes de onda posición y momento en \mathcal{H}_{macro} , en términos de distribución estadística -e.g. representados por gaussianas- entorno a los valores que será los resultados definidos en física clásica en el espacio de las fases.
4. Construcción del estado del sistema ψ mediante la superposición de esos estados macro. Por ejemplo, expansión de Fourier de los estados posición y momento.
5. Cálculo de las probabilidades de encontrar los valores macroscópicos del sistema gracias a la densidad de probabilidad definida por el módulo cuadrado de los coeficientes de la expansión. Interpretando el estado como una mezcla.
6. Selección de uno de los términos de la expansión¹³⁰.

El proceso de medida recorta el exceso de estructura matemática para especificar los estados que representan a los sistemas particulares. Mediante este procedimiento, se dota de contenido empírico a la teoría, imponiendo restricciones a la descomposición de operadores, bases o del sistema en subsistemas.

Un ejemplo de especificación del citado algoritmo, o sea una interpretación de la teoría, conecta el formalismo matemático con la física gracias a un modelo basado en el principio puente de la repetibilidad:

- **Principio de predictibilidad o repetibilidad:** la inmediata repetición de la medida nos confirmará el resultado obtenido.

Esto significa que tras obtener los resultados de las medidas, el estado del sistema es conocido y, por lo tanto, parece obvio que una segunda medida debería poder confirmarlo. Sin esta condición no se podría predecir la evolución del estado cuántico, no sólo en el instante inmediatamente posterior a la medida, sino para todo tiempo. En efecto, como explica [Maudlin, 1995], el cambio de estado tras la medida propaga el efecto de ésta en el futuro. Imponer la repetibilidad es algo intuitivo, aunque no parece fácil su comprobación experimental.

¹³⁰David Wallace no menciona el paso final del algoritmo, tal vez influido porque es uno de los grandes defensores de la interpretación de los múltiples mundos y, por lo tanto, existen múltiples resultados. A nuestro entender, es totalmente necesaria puesto que, cuando menos, se debe explicar la experiencia de encontrar un único resultado.

Bajo este principio, el algoritmo consta de dos operaciones:

4.- El principio de Reducción

- 4.1- Los resultados “ a_k ” están restringidos a los autoestados ortogonales $\{|a_k\rangle\}$ del operador proyección $\{P_k\}$ del espacio vectorial de los operadores lineales hermíticos sobre \mathcal{H} que representa todas las propiedades medibles.
- 4.2- Sólo es posible un resultado a_k en cada medida correspondiente al autoestado del operador hermítico medido.

Como, en general no se pueden determinar los resultados con certidumbre total, se necesita otro principio para enlazar la estructura matemática con la predicción física.

- 5.- **Regla de Born** : la probabilidad de que el estado $|\psi\rangle$ se encuentre en alguno de sus autoestados $|a_k\rangle$ tras una medida, coincide con el valor medio del operador en el estado $|\psi\rangle$ y se obtiene calculando el módulo cuadrado de las amplitudes de probabilidad, representadas por el producto escalar $\langle\psi|a_k\rangle$.

$$p(\psi \rightarrow a_k) = \langle \hat{P}_k \rangle_{|\psi\rangle} = \langle \psi | P_k^\dagger P_k | \psi \rangle = |\langle \psi | a_k \rangle|^2 \quad (3.3)$$

Explicitemos un modelo de medida para calcular los resultados del experimento de Stern-Gerlach. El estado de superposición está descrito mediante la superposición de dos estados ortogonales:

$$|\psi_f\rangle = \alpha|z_\uparrow\rangle \otimes |a \uparrow\rangle + \beta|z_\downarrow\rangle \otimes |a \downarrow\rangle \quad (3.4)$$

Si aplicamos el principio de colapso a los estados del electrón que forman parte de la expansión (h.e. $|z_\uparrow\rangle$ y $|z_\downarrow\rangle$), obtendremos los estados del puntero asociados (h.e. $|a \uparrow\rangle$, $|a \downarrow\rangle$) que serán los resultados posibles de la medida, pues son los autoestados ortogonales del operador proyección que representa la propiedad medible por el dispositivo.

Por otro lado, según el principio de repetibilidad, el estado que representa el sistema tras la medida corresponderá al estado seleccionado correspondiente. Esto es, $|a \uparrow\rangle$ ó $|a \downarrow\rangle$.

Ahora bien, no sabemos con absoluta certeza¹³¹ cuál de los dos posibles resultados será el obtenido. Por lo tanto, debemos calcular la probabilidad mediante el tercer principio de nuestro algoritmo.

La regla de Born calcula estas probabilidades como el cuadrado de las amplitudes - h.e. los coeficientes α y β - de los posibles autoestados solución. Es decir, encontraremos el puntero en el estado $|a \uparrow\rangle$ con probabilidad $|\alpha|^2$ y estará en el estado $|a \downarrow\rangle$ con probabilidad $|\beta|^2$, donde las amplitudes cumplen la condición de normalización $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

¹³¹Obviamente, salvo que el estado inicial correspondiera a la preparación de alguno de los estados iniciales (h.e. $|z_\uparrow\rangle$ y $|z_\downarrow\rangle$).

Los tres principios del algoritmo nos facilitan los resultados de la observación:

$$|\psi\rangle \rightarrow \begin{cases} \rightarrow |\alpha|^2 \rightarrow |z_{\uparrow}\rangle \\ \rightarrow |\beta|^2 \rightarrow |z_{\downarrow}\rangle \end{cases}$$

Esta versión de la formulación del problema de la medida tiene la ventaja de separar la teoría de los distintos modelos que la dotan de contenido empírico. Dicho de otro modo, distingue claramente la teoría de la interpretación¹³².

3.4. El problema de la medida

Como hemos visto en la tercera sección de este capítulo, el problema de la medida se refiere a la indefinición de los resultados cuando los sistemas en interacción se representan exclusivamente mediante el formalismo cuántico. Para recuperar los resultados definidos se plantea un algoritmo, el proceso de medición. No obstante, el marco teórico no aclara con precisión cuando una interacción constituye o no una medida¹³³. Por otro lado, al requerir de dos modelos de descripción dinámica incompatibles plantea una división de ámbitos que quiebra la visión unificada de la teoría.

En efecto, los dos tipos de dinámicas son: (1) una evolución líneal, continua y determinista (**U**), derivada de los tres principios de la teoría, y (2) un colapso o reducción de estado indeterminista, discontinuo y no líneal (**R**) consecuencia del algoritmo que implementa la medida. Siguiendo este planteamiento, algunos autores¹³⁴ dividen el problema de la medida en dos, a saber: el pequeño problema de la medida y el gran problema de la medida.

¹³²Otras exposiciones del proceso de medida no tienen este carácter. Por ejemplo, como ya observara [Fine, 1973a], la caracterización de von Neumann del problema de la medida contemplaba de manera implícita que una vez obtenido el resultado de la medida (el autovalor), el estado del sistema necesariamente se encontraría en el autovector correspondiente. Ésta es una suposición adicional que estaba incluida en la teoría. Es decir, la necesaria ligadura autovalor-autovector no se puede deducir del formalismo y por lo tanto no debe formar parte de él. Con otras palabras, el hecho de que una segunda medida sobre el sistema deba confirmar el resultado de una primera medida, esto es, que el autoestado de la segunda medida se encuentre en el autovalor correspondiente a la primera, no implica que el autoestado de la primera medida corresponda al autovalor.

Además, como bien apunta [Wallace, 2008, p. 21], esta manera de presentar el problema está viciada porque no es neutral desde el punto de vista de las operaciones de medida en el laboratorio. Ya que, como sabemos, no tienen por qué estar representadas por proyectores ortonormales P , pues pueden formalizarse desde un punto de vista más general. Éste es el caso de las medidas no proyectivas (POVM) que son importantes para dar cuenta de situaciones en que la presencia de ruido en la primera medida no garantiza que en una medida consecutiva obtengamos el mismo resultado. Dicho de otro modo, no se cumple con certeza la predicción tras la primera medida.

¹³³En palabras de John Bell: “[...] desde el momento que la reducción del paquete de ondas es un componente esencial, y en tanto que no sabemos con precisión cuándo y cómo tiene lugar ésta a partir de la ecuación de Schrödinger, no disponemos de una exacta e inequívoca formulación de nuestra teoría física más fundamental” [Bell, 1990, p. 87].

¹³⁴Ver por ejemplo [Landsman, 2017, p. 441].

- (1) El pequeño problema de la medida consiste en explicar la transición desde el estado puro, el representado por el estado de superposición de los sistemas compuestos (3.2), al estado mezcla, que es aquél que supuestamente se podría interpretar como si los resultados probables $[|z_{\uparrow}\rangle, |z_{\downarrow}\rangle]$ fueran mezcla de los posibles estados clásicos. La solución de este problema requiere dar cuenta de dos cuestiones: el problema de la ambigüedad de la base y el problema de las interferencias.
- (2) La selección de uno de los resultados posibles de la mezcla, se conoce como “el problema grande de la medida”. Sin resolver este último paso, la teoría cuántica no sería empíricamente adecuada. Las experiencias en laboratorio y la vida cotidiana nos aseguran la existencia de resultados definidos. La teoría junto al modelo descrito más arriba calcula, con una precisión increíble, la probabilidad de obtener cada uno de los distintos resultados. No obstante, la teoría no explica por qué de los resultados posibles se selecciona uno y cuál es el origen de la probabilidad y su naturaleza. Con otras palabras, una buena interpretación debería informar sobre si la naturaleza de la probabilidad es epistémica u ontológica.

3.4.1. Solución al pequeño problema de la medida

Para el desarrollo de las siguientes secciones, en las que deberemos tomar en consideración sistemas cuánticos abiertos, es conveniente representar el formalismo en la versión más general posible gracias a los operadores densidad¹³⁵.

La formulación de la teoría cuántica mediante operadores densidad permite representar los estados mezcla que incluyen aquellas preparaciones¹³⁶ de estados puros que, en condiciones normales, se realizan con cierta probabilidad, v.gr. para cada estado:

$$p_1 \rightarrow |\psi_1\rangle \quad p_2 \rightarrow |\psi_2\rangle \quad p_3 \rightarrow |\psi_3\rangle \quad \dots \quad p_r \rightarrow |\psi_r\rangle$$

Si la colectividad (*ensemble*) viene representada por $\{p_k, |\psi_k\rangle\}$ el sistema así descrito tiene la probabilidad p_k de estar en el estado $|\psi_k\rangle \in \mathcal{H}$ con $0 \leq p_k \leq 1$ donde $\sum_i p_i = 1$.

Por tanto, en el caso particular del postulado de completud en el que el sistema se representa por un estado puro $|\psi\rangle$, el operador densidad toma la forma:

$$\hat{\rho}_{puro} \equiv |\psi\rangle\langle\psi| \equiv P \quad (3.5)$$

P es el operador que proyecta el vector sobre el subespacio ortogonal del espacio de Hilbert¹³⁷ y representa la propiedad que se desea medir.

¹³⁵Para más información, puede consultarse el apéndice (A.2).

¹³⁶También denominadas medidas de primera especie, son aquellas medidas que preparan el sistema en el estado con propiedades definidas de forma que una medida consecutiva encuentre el mismo resultado.

¹³⁷Medidas y preparaciones de proyección ortogonal o PVM.

En el caso de nuestro ejemplo del experimento de Stern-Gerlach, en esta nueva notación, los estados para el espín electrónico y del dispositivo correspondiente serán: $P_{z\uparrow} = |z\uparrow\rangle\langle z\uparrow|$; $P_{z\downarrow} = |z\downarrow\rangle\langle z\downarrow|$; $P_{a\uparrow} = |a\uparrow\rangle\langle a\uparrow|$ y $P_{a\downarrow} = |a\downarrow\rangle\langle a\downarrow|$.

Una vez que ponemos a los dos sistemas en interacción, el sistema compuesto se representa mediante¹³⁸:

$$\hat{\rho}_{puro} = |\alpha|^2 P_{\uparrow\uparrow} + |\beta|^2 P_{\downarrow\downarrow} + \alpha^* \beta P_{\uparrow\downarrow} + \beta^* \alpha P_{\downarrow\uparrow} \quad (3.6)$$

donde se cumple la normalización $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

En el estado puro $\hat{\rho}_{puro}$, los dos últimos términos cruzados de la parte derecha de la ecuación dan cuenta de la superposiciones cuánticas. Es decir, el estado así considerado contiene toda la información posible del sistema compuesto. No obstante, no toda la información es accesible ya que, como hemos visto, no se observan estados en superposición cuántica.

El problema de la ambigüedad de la base alude a la posibilidad de representar el estado puro mediante otros conjuntos de bases diferentes. Esto es, con otras orientaciones como pueden ser: $\{|x\uparrow\rangle, |x\downarrow\rangle\}$; $\{|y\uparrow\rangle, |y\downarrow\rangle\}$, etc. Esto significa que la descomposición del sistema compuesto no es única¹³⁹: el estado puro del sistema compuesto, como expresa el punto cuatro del algoritmo de medida, se podría haber expandido matemáticamente de infinitas maneras correspondientes a infinitas orientaciones del aparato de medida.

Lo que ha sucedido es que al ejecutar dicho algoritmo hemos elegido la base de representación del estado compuesto guiados por el montaje experimental. Sin embargo, en la naturaleza no conocemos cómo se determina la base de la medida¹⁴⁰. Es más, si consideramos al observador como otro sistema cuántico, la descomposición sigue sin poder fijarse de antemano¹⁴¹.

En una segunda fase, al estado puro así considerado, se le aplica el algoritmo de medida: una dinámica no líneal (**R**) mediante la operación denominada de traza parcial sobre los estados del objeto. De esta forma obtenemos una expresión en términos de los posibles estados finales del aparato. Éste es el denominado estado reducido o estado mezcla en el que se han deslocalizado los términos de las interferencias.

$$\hat{\rho}_{reducido} = |\alpha|^2 P_{a\uparrow} + |\beta|^2 P_{a\downarrow} \quad (3.7)$$

¹³⁸Para aligerar la notación, eliminamos las letras que representan al sistema y al aparato de los subíndice teniendo en cuenta que están representadas por la posición de la flecha primera y segunda respectivamente.

¹³⁹Además, como apuntamos en la sección anterior, las bases de la descomposición $\{|a_k\rangle\}$ no tienen necesariamente por qué ser mutuamente ortonormales.

¹⁴⁰Incidentalmente, ésta es una de las diferencias importantes entre la formulación de la mecánica cuántica debida a Dirac en su libro de 1930 y la de Von Neumann [1932]. La primera se resolvía relativa a una elección de base generalizada del espacio de Hilbert, mientras que en la segunda, la base era absoluta. [Landsman, 2017: p. 2].

¹⁴¹Cuando veamos la interpretación existencial de Zurek estudiaremos este problema.

Ahora bien, la operación matemática no parece dotar de sentido físico a dicho estado. Simplemente elimina parte de la información contenida en el sistema compuesto.

Por otro lado, si el estado puro del sistema compuesto $\hat{\rho}_{puro}$ se hubiera representado en otra base distinta, entonces es evidente que habríamos encontrado un estado reducido diferente.

En términos de propiedades, el problema de la ambigüedad de la base muestra que la estructura matemática no fija la propiedad a medir e incluso que esas propiedades pueden ser incompatibles. Por tanto, la pregunta por la ambigüedad de la base es también una cuestión sobre el mecanismo que selecciona las propiedades que se pueden observar en la naturaleza y por qué otras nunca se observan. Dicho de otra manera, ¿por qué sólo algunos y no todos los rayos de un espacio de Hilbert representan un estado puro del sistema¹⁴²?

Ahondando en la naturaleza de la representación del operador densidad reducida, hay que subrayar que aunque no aparezcan términos cruzados correspondientes a las interferencias, no se debe concluir que el sistema carezca de naturaleza cuántica. De hecho, las interferencias cuánticas siguen presentes y podrían reaparecer en un cambio de base.

En definitiva, sin una interpretación física de la operación de reducción, sólo podemos asegurar que tras una operación matemática de “grano grueso”, implementada mediante una traza parcial, se pueden eliminar los términos de interferencia. Dicha operación no es más que un mapeo desde un conjunto a otro en el que se pierde información cuando la aplicación no es inyectiva. Con otras palabras, la operación sólo ha cambiado el grano de la resolución, o “tamaño de pixel”, de nuestra “fotografía” del estado puro (fig. 3.4).

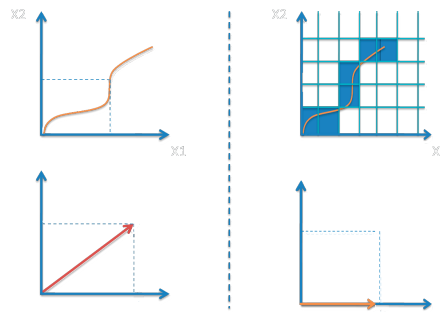


Figura 3.4: Operación de grano grueso (OGG). En la parte superior, la trayectoria continua de la figura de la izquierda contiene toda la información. Tras la (OGG), se obtiene una figura pixelada como resultado de la pérdida de información. En la parte inferior, la (OGG) de un vector se obtiene mediante la operación de proyección sobre uno de la base de representación. Por tanto, se pierde la información de la componente complementaria de la base.

Por lo tanto, la teoría debe explicar por qué no observamos la superposición o coherencia de estados. Experimentalmente, las interferencias parecían estar circunscritas al microcosmos (electrones, neutrones, átomos, etc.) pero desde el éxito de los trabajos de interferencias conseguidas con moléculas fullereno (C_{70}) [Ardnt et al., 1999], la frontera de

¹⁴²De otra manera, ¿Cuál es la procedencia de las denominadas reglas de “superselección”? [Galindo y Pascual, 1989, p. 121].

aplicación del principio de superposición no parece estar limitada por la escala del objeto sino por la capacidad de aislar los sistemas de su interacción con el entorno¹⁴³.

En resumen, el formalismo cuántico predice que tras la interacción entre los dispositivos de medida, y en general cualquier sistema macroscópico, con sistemas microscópicos, se producen estados macroscópicos de superposición. Esto es lo que indica la paradoja del gato de Schrödinger. Es decir, los sistemas macroscópicos deberían mostrar las características propias de los sistemas microscópicos descritos por la mecánica cuántica. Pero la experiencia cotidiana desmiente tal afirmación.

La pregunta que se debe contestar es cómo desde un supuesto sustrato cuántico del mundo se pueden explicar los sistemas clásicos y sus propiedades [Schlosshauer, 2007, p. 49]. Éste es el denominado problema de la transición cuántico-clásico que puede abordarse desde las distintas interpretaciones.

¹⁴³Como veremos, el entorno puede ser entendido en el sentido de grados de libertad tanto internos como externos. Como curiosidad, se han conseguido mantener las interferencias de átomos gracias a pulsos de luz con paquetes de onda separados más de medio metro [Kovachy et al. , 2015].

Capítulo 4

Decoherencia

4.1. Introducción

Los experimentos que acabamos de describir nos indican que si se consigue un alto grado de aislamiento en la interacción entre sistemas cuánticos, pueden emerger el comportamiento cuántico a escalas mayores que las atómicas. Por lo tanto, los efectos cuánticos puede que sean ubicuos si se mantiene el sistema al margen de las influencias del ambiente. El entorno lo forman aquellos grados de libertad externos o internos capaces de provocar la caída de las interferencias cuánticas¹⁴⁴.

La consecuencia principal de estas investigaciones es que la dinámica de interacción entre sistemas cuánticos no se puede considerar como un sistema cerrado, salvo en el caso de que dicho sistema sea el universo al completo [Zeh, 1970, p. 346]. Sólo si las componentes del dispositivo de medida incluyen al resto del universo se podría considerar que el estado final $\hat{\rho}_{puro}$ representa la interacción de sistemas completamente cerrados. Por esta razón, para entender la naturaleza del estado puro es necesario investigar el significado de las superposiciones de estados mesoscópicos y macroscópicos.

Con otras palabras, para resolver el problema de la medida se debía tomar en serio la propiedad cuántica del entrelazamiento que es fruto de los tres principios que presentamos en la teoría. Su naturaleza, conocida ya en los años treinta [Schrödinger, 1935, p. 827], se puede describir de la siguiente manera: existe una dependencia dinámica entre los subsistemas que forman el sistema conjunto incluso cuando los dos subsistemas se encuentran en localizaciones espaciales distantes. Dicho de otra manera, a diferencia de las correlaciones clásicas que son de naturaleza puramente estadística y que suelen derivarse de leyes de conservación¹⁴⁵, en las correlaciones cuánticas, el estado del conjunto no es la suma del estado de sus partes y esto se evidencia porque una medida sobre uno de los subsistemas cambia el estado de los subsistemas correlacionados con él, independientemente de la distancia que medie entre ellos.

¹⁴⁴Para una introducción a decoherencia por sus creadores ver [Joos et al., 2003].

¹⁴⁵Ver por ejemplo, [Schlosshauer, 2007, p. 30].

Si consideramos las dificultades inherentes al aislamiento entre los sistemas, entonces, el entrelazamiento es ubicuo. Atendiendo al problema de la medida, la cuestión que se debe formular versa sobre las posibles consecuencias de incorporar todas las superposiciones cuánticas, incluidas las del ambiente, cuando realizamos una medida local.

El proceso se realiza en los dos pasos descritos en el capítulo anterior. En el primero, se produce una correlación cuántica total no local entre los subsistemas en interacción - sistema, dispositivo de medida y entorno - producto de la dinámica lineal. Por tanto, su resultado se representa mediante un estado compuesto del conjunto, o estado puro $\hat{\rho}_{puro}$, cuyas propiedades no pueden deducirse de la de los sistemas individuales. Esto significa, como advertimos, que el todo es más que la suma de las partes. Ahora bien, de igual manera, la pérdida de individualidad de los subsistemas que forman parte del sistema compuesto va a provocar que cuando deseemos adscribir propiedades a los sistemas individuales, éstas hayan cambiado.

En consecuencia, el segundo paso describe la asignación de propiedades a los subsistemas componentes. El proceso formal debería detallar cómo la evolución pierde aparentemente la linealidad con el tiempo debido a las contribuciones de las interacciones entre el sistema, el aparato y los innumerables grados de libertad del entorno cuando las medidas son locales. Esta evolución se implementa mediante la operación de grano grueso mencionada en la sección anterior que toma en consideración los estados del sistema bajo estudio e ignora parte de los grados de libertad del entorno. Esto parece razonable pues es imposible acceder a los innumerables grados de libertad del ambiente.

No obstante, la intención final era aplicar el formalismo cuántico sin acudir al algoritmo de la medida, pero la evolución no lineal se implementa mediante la traza parcial y ésta depende de la regla de Born del cálculo de las probabilidades. Aunque ahora el modelo de decoherencia dote de significado físico a la operación de grano grueso, implícitamente se ha introducido el algoritmo de colapso **R**. Veremos mas adelante como Zurek intenta resolver el problema sin acudir matemáticamente a la operación de traza, justificando la regla de Born directamente del formalismo.

Asumamos por el momento que el mecanismo físico de la decoherencia conecta de alguna manera el formalismo matemático con el mundo percibido. Si es así, del estado final, $\hat{\rho}_{reducido}$, se obtendrán las posibles propiedades “observables”, lo que solucionará el problema de ambigüedad de la base¹⁴⁶. Con otras palabras, este mecanismo resuelve el denominado problema ontológico, pues dichos estados aportan las condiciones de posibilidad del conocimiento de las propiedades. Ahora bien, el estado reducido simplemente se parece al de un conjunto estadístico. Como advertimos, esto significa que aunque no sean accesibles, las superposiciones cuánticas siguen presentes. Ésta es la razón por la que se denomina “cuasi-clásico” al estado reducido fruto de la decoherencia física.

Por otro lado, también el modelo de decoherencia explica la dificultad, si no

¹⁴⁶No obstante no existe unanimidad en que decoherencia resuelva esta cuestión. Algunos académicos acusan al mecanismo de circularidad como discutiremos más adelante.

imposibilidad, de detectar las interferencias cuánticas tras una medida local. Si consideramos que los sistemas macroscópicos están en contacto permanente con el entorno, esto significa que están siendo medidos continuamente por el ambiente local. Ésta es la posible razón de que no se observen en la naturaleza las superposiciones cuánticas macroscópicas.

Como hemos referido, el proceso de decoherencia no es instantáneo, se despliega en el tiempo. Por lo tanto, deberían ser accesibles indirectamente los estados intermedios de la evolución entre el estado global entrelazado y la asignación de propiedades a los subsistemas. Esto se puede llevar a cabo si se consigue un gran aislamiento de los subsistemas y se controla la incorporación de los grados de libertad del entorno a la interacción. La investigación de los últimos años ha mostrado que se puede controlar empíricamente la caída de las superposiciones monitorizando el grado de aislamiento entre los sistemas y el entorno [Haroche, 1998].

Por último, como hemos apuntado, el programa de decoherencia pretende resolver el problema de la transición cuántico-clásico. Es una continuación del programa conocido, desde los años veinte del siglo pasado, como límite clásico de la mecánica cuántica. Tradicionalmente, el problema se abordó intentando poner en relación las ecuaciones dinámicas de la mecánica clásica y las de la teoría cuántica¹⁴⁷. La aproximación entre dichas ecuaciones se realizaba mediante el estudio de su evolución en el espacio de las fases. Ejemplos son el método WKB, que es semejante a la aproximación geométrica en óptica para valores elevados de los números cuánticos o, en el caso del teorema de Ehrenfest (1927), el límite cuando la constante de Planck tiende a cero. Niels Bohr también contribuyó a estas investigaciones gracias a su principio de correspondencia.

Lo cierto es que, si los estados se encuentran en superposición o los operadores que describen las propiedades no son del tipo adecuado¹⁴⁸ no es posible la emergencia de las leyes dinámicas [Landsman, 2007, p.515]. Dejando de lado cuestiones conceptuales sobre inconmensurabilidad interteórica, ni siquiera considerando modelos combinados de distintos enfoques, se consigue una descripción aproximada realizable. Por esta razón, Zurek considera que es necesario atacar el problema no sólo desde el punto de vista de las ecuaciones del movimiento sino también de los estados [Zurek, 2002, p. 15].

La cuestión es cómo conseguir una aproximación clásica desde los estados cuánticos, pues la función de onda que porta toda la información en mecánica cuántica se describe en el espacio de Hilbert complejo o en el espacio de configuración de múltiples dimensiones, mientras que los estados clásicos se representan en el espacio de las fases o en el espacio físico tridimensional o tetradimensional. Aparentemente, para algunos estudiosos¹⁴⁹ las soluciones pasan por transformar la estructura algebraica no conmutativa de la representación cuántica a un álgebra abeliana. La opción que toma Zurek supone, como

¹⁴⁷Para profundizar en este tema, consultar [Rivadulla, 2004, cap. 4] donde se aclaran los problemas conceptuales como la inconmensurabilidad y para un estudio técnico [Martínez, 2002].

¹⁴⁸e.g. no son cuadráticos en las posiciones y en los momentos.

¹⁴⁹Véase [Landsman, 2007] y Landsman en [Faye y Folse, 2017].

veremos, realizar el estudio de la transformación de distribuciones de probabilidad cuántica a la clásica en el espacio de las fases.

4.2. El formalismo de decoherencia

La decoherencia física¹⁵⁰ es el resultado de un proceso dinámico causado por la interacción espontánea entre sistemas cuánticos y el entorno. En consecuencia, son una extensión del formalismo antes presentado y, por tanto, es independiente de cualquier interpretación.

Se entiende por estado coherente aquél en el que se encuentran localizadas las relaciones de fase, que son las relaciones entre las distintas componentes de la superposición del estado puro que representan al conjunto enredado de sistema, aparato y entorno. Por tanto, la decoherencia consiste en la pérdida de la coherencia causada por la deslocalización de las relaciones de fase del estado de un sistema cuántico compuesto en los grados de libertad del entorno. En consecuencia, las correlaciones cuánticas se desubican en los N grados de libertad del ambiente. Si el entorno es muy complejo - es decir en el límite de infinitos grados de libertad ($N \rightarrow \infty$) - las interferencias cuánticas serán prácticamente inaccesibles a la observación.

La idea fundamental consiste en agregar eslabones a la cadena de entrelazamiento - o cadena de Von Neumann -, pero ahora el observador no es el destino final. Lo que se pretende es que la cadena se disperse en la inmensidad de las cuentas del entorno. La única forma de poder aplicar la interpretación de la ignorancia del estado mezcla sería que el entorno fuera de hecho clásico y esto supondría caer en una petición de principio pues justamente esto es lo que se intenta demostrar. No obstante, como sugiere [Landsman, 2007, p.517, Nota 312], la solución de considerar el dispositivo de medida o el entorno “como si fuera clásico” podría deshacer esta circularidad. Al final de esta sección, analizaremos a qué se refiere el marco teórico con este concepto de “cuasi-clasicidad”.

Pasamos ahora a exponer el mecanismo de decoherencia de manera simplificada¹⁵¹.

Sea un sistema S aislado que representamos por $|s\rangle = a|s_1\rangle + b|s_2\rangle \in \mathcal{H}_S$ con $\{|s_1\rangle; |s_2\rangle\}$ base y $a, b \in \mathbb{C}$ coeficiente complejos. El estado inicial del entorno E viene representado por $|\epsilon_0\rangle \in \mathcal{H}_E$.

Una vez acoplados, la interacción y la evolución unitaria del conjunto U , conduce al entrelazamiento según:

$$|s\rangle \otimes |\epsilon_0\rangle \xrightarrow{U} \psi(t) = |s\epsilon\rangle \quad (4.1)$$

En componentes, donde a y b son las amplitudes complejas normalizadas, el estado final

¹⁵⁰No se debe confundir la decoherencia física o simplemente decoherencia con la interpretación de la mecánica cuántica de historias consistentes o decoherentes [ver, Bacciagaluppi, 2014].

¹⁵¹Para una visión de conjunto se puede consultar [Schlosshauer, 2007].

toma la forma:

$$|\psi(t)\rangle = a|s_1\rangle|\epsilon_1\rangle + b|s_2\rangle|\epsilon_2\rangle \in \mathcal{H}_{s\epsilon} \quad (4.2)$$

El operador densidad por lo tanto será:

$$\hat{\rho}_{s\epsilon}(t) = |\psi(t)\rangle\langle\psi(t)| \quad (4.3)$$

que se desarrolla según:

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_{s\epsilon}(t) = & |a|^2|s_1\rangle\langle s_1||\epsilon_1\rangle\langle\epsilon_1| + |b|^2|s_2\rangle\langle s_2||\epsilon_2\rangle\langle\epsilon_2| \\ & + a^*b|s_1\rangle\langle s_2||\epsilon_1\rangle\langle\epsilon_2| + ab^*|s_2\rangle\langle s_1||\epsilon_2\rangle\langle\epsilon_1| \end{aligned}$$

Los términos de la segunda línea representan las superposiciones cuánticas. En la notación matricial del operador densidad del estado conjunto de sistema y entorno SE será:

$$\hat{\rho}_{s\epsilon}(t) = \begin{pmatrix} |a|^2 & a^*b \\ b^*a & |b|^2 \end{pmatrix} \in \mathcal{H}_{s\epsilon} \quad (4.4)$$

Los términos cruzados de la diagonal secundaria representan el solapamiento o las interferencias.

Si queremos obtener información del sistema S promediaremos sobre los grados de libertad del entorno operando con la traza parcial¹⁵² sobre $\hat{\rho}_{s\epsilon}(t)$ para obtener la matriz densidad reducida:

$$\hat{\rho}_s^{red}(t) = Tr^E \hat{\rho}_{s\epsilon}(t) = \sum_i \langle\epsilon_i|\hat{\rho}_{s\epsilon}|\epsilon_j\rangle \quad (4.5)$$

Esta operación de forma explícita promedia según la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_s^{red}(t) = & |a|^2|s_1\rangle\langle s_1|\langle\epsilon_1|\epsilon_1\rangle + |b|^2|s_2\rangle\langle s_2|\langle\epsilon_2|\epsilon_2\rangle \\ & + a^*b|s_1\rangle\langle s_2|\overline{\langle\epsilon_1|\epsilon_2\rangle} + ab^*|s_2\rangle\langle s_1|\overline{\langle\epsilon_2|\epsilon_1\rangle} \end{aligned}$$

Ahora podemos analizar los términos del producto escalar de las componentes del entorno:

$$\langle\epsilon_i|\epsilon_j\rangle = \begin{cases} i=j & \langle\epsilon_1|\epsilon_1\rangle = \langle\epsilon_2|\epsilon_2\rangle = 1 \\ i \neq j & \overline{\langle\epsilon_1|\epsilon_2\rangle} = \overline{\langle\epsilon_2|\epsilon_1\rangle} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

El caso de vectores paralelos y de norma unidad es trivial, su producto es la unidad. En el segundo caso los vectores no son paralelos. En general forman un ángulo entre ellos. Se llegará a la condición de ortogonalidad si tenemos en cuenta que los cosenos directores

¹⁵²Es importante recordar cómo se obtiene formalmente esta sustitución mediante la operación de traza parcial sobre los grados de libertad del entorno, cuestión que presentamos en el apéndice (A.2.2).

están acotados entre 0 y 1, $\langle \epsilon_i | \epsilon_j \rangle = \cos \alpha_i \in [0, 1]$, y que para un entorno con un número grande de grados de libertad $|\epsilon\rangle = \prod_i |\epsilon_i\rangle$, el producto de los cosenos directores tiene límite 0. Esto es: $\Delta = (\cos \alpha_1)(\cos \alpha_2) \dots (\cos \alpha_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} (\cos \alpha_i)^n \rightarrow 0$

De esta manera se obtiene el estado reducido:

$$\hat{\rho}_s^{red}(t) = |a|^2 |s_1\rangle \langle s_1| + |b|^2 |s_2\rangle \langle s_2| \quad (4.7)$$

Esto significa que la matriz de densidad ha evolucionado de forma no lineal a la matriz de densidad reducida en la que los términos que representan las interferencias, diagonal secundaria, tienden rápidamente a 0 en el denominado tiempo de decoherencia. El tiempo de pérdida de la coherencia dependerá de la evolución promediada de los estados del entorno. En otras palabras, en un tiempo determinado¹⁵³ - compatible con el tiempo de interacción- los estados del entorno pierden el solapamiento gracias a la dinámica no lineal representada por la ecuación maestra y tienden a ser ortogonales, esto es: $\langle \epsilon_i(t) | \epsilon_j(t) \rangle = \lambda(t_{dec}) \rightarrow 0$. Esto indica que los estados serán distinguibles.

Es decir, la matriz de densidad evoluciona de forma no unitaria e irreversible a la forma diagonal:

$$\hat{\rho}_{s\epsilon}(t) = \begin{pmatrix} |a|^2 & a^*b \\ b^*a & |b|^2 \end{pmatrix} \xrightarrow{t_{dec}} \hat{\rho}_s^{red}(t) = \begin{pmatrix} |a|^2 & \Delta(t) \rightarrow 0 \\ \Delta(t) \rightarrow 0 & |b|^2 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Lo que ha sucedido es que en la evolución temporal del estado se han deslocalizado la relación de fase en los grados de libertad del entorno.

$$|\Psi\rangle = |s_i\rangle |\epsilon_i\rangle \rightarrow e^{-i\theta(t)} |s_i\rangle |\epsilon_i\rangle \rightarrow |s_i\rangle e^{-i\theta(t)} |\epsilon_i\rangle \rightarrow |s_i\rangle |\epsilon_i(t)\rangle$$

Para conseguir este objetivo, se debe imponer que la interacción incluida en la fase $\theta(t) = H_{int}t$ donde H_{int} representa la dinámica mediante el hamiltoniano de interacción, no cambie los estados del sistema $|s_i\rangle$ sino los del entorno $e^{-i\theta(t)} |\epsilon_i\rangle = |\epsilon_i(t)\rangle$ para extender, posteriormente, el promedio sobre sus grados de libertad.

La matriz de densidad reducida no representa una mezcla propia debido a que el estado total $S + E$ sigue entrelazado, se ha conseguido meramente que el estado muestre forma diagonal o cuasi diagonal¹⁵⁴. Con otras palabras, no puede interpretarse los estados, que representan la base del estado reducido como si ignoráramos en cuál de los dos estados que forman parte de la suma estadística clásica $\hat{\rho} = p_1 |s_1\rangle \langle s_1| + p_2 |s_2\rangle \langle s_2|$ -con p_1 y p_2 probabilidades de encontrarse en el estado 1 ó en el 2-, se encuentra nuestro sistema.

La cuestión trascendental es que el sistema total, compuesto por sistema más el entorno $S + E$, sigue entrelazado y ,por lo tanto, la matriz de densidad reducida no representa

¹⁵³En la mayoría de los modelos, el tiempo de decoherencia cae rápidamente cuando aumenta el número de grados de libertad del entorno y suele depender del estado inicial tanto del sistema como del entorno [Schlosshauer, 2007, cap. 3].

¹⁵⁴No obstante, como sabemos, todos los operadores hermíticos pueden representarse en forma diagonal eligiendo una base adecuada.

sólo al sistema S aislado. De hecho si hubiéramos tomado la traza sobre el sistema y se la sumáramos a la traza sobre el entorno, tampoco obtendríamos el estado completo. Dicho de otra forma, habríamos perdido información. No obstante, la matriz densidad reducida representa la máxima información que podemos obtener localmente sobre el sistema. Es decir, es una herramienta matemática que reproduce la estadística de las medidas locales sobre el sistema, aunque éste siga entrelazado con el entorno.

La transición no lineal entre la matriz de densidad y la matriz densidad reducida, se computa a través de la ecuación maestra (EM), como veremos en la sección (4.4):

$$\hat{\rho}_{se}(t) \xrightarrow{EM} \hat{\rho}_s^{red}(t) \quad (4.9)$$

El comportamiento cuasi-clásico se deriva de la dinámica de la evolución temporal de la distribución de los resultados que toma trayectorias del tipo newtoniano:

$$\frac{d\hat{\rho}_s^{red}(t)}{dt} \approx \text{clasico} \quad (4.10)$$

Así pues, se da un equilibrio entre la irreversibilidad a un nivel local y la descripción global cuántica, que respeta la reversibilidad.

Antes de considerar los distintos criterios formales que sirven para obtener la base del puntero, es conveniente aclarar qué significado encierra el concepto “cuasi-clásico” o si existe una jerarquía o gradación entre los estados cuánticos y los puramente clásicos, lo que se conoce con el neologismo “clasicidad”¹⁵⁵.

Recordemos que el estado del sistema es una especificación completa de todos los valores de las propiedades de un sistema físico en un determinado instante, revelados a través de un proceso de medida. Por tanto, una propiedad clásica es aquel observable que pertenece a la física clásica como la posición, el momento, la energía, la polarización, etc. Todas estas propiedades presentan valor bien definido en física clásica. Veremos que el grado de estabilidad y definición es el que puede servir para jerarquizar aquellos estados cuánticos en orden de “clasicidad”.

Dentro de los estados puros cuánticos, los estados propios discretos de propiedades clásicas serían los mejor definidos. Pero si los estados propios de esos observables clásicos son continuos - como la posición, el momento, etc. - presentarán dispersión en torno de un cierto valor central. En este caso, la definición depende de dicha dispersión: cuanto más aguda¹⁵⁶ mejor definida y más cerca a la representación clásica. Los estados formados por superposición coherente de estados cuánticos están más cercanos a la completa definición cuanto menor sea la dispersión. A estos estados se les denomina “cuasi-clásicos” porque, a pesar de su apariencia clásica, son evidentemente cuánticos.

En el caso de que los observables no se correspondan con alguno de la física clásica - e.g., el espín -, se les da un tratamiento análogo con algunas propiedades clásicas como

¹⁵⁵ Seguimos ampliamente la caracterización dada en [Schlosshauer y Camilleri, 2011].

¹⁵⁶ Como es sabido, las gaussianas son la representación más común de los estados propios del continuo. En el caso de que la representación fuera completamente aguda el estado cuántico no sería normalizable.

el momento angular. De esta manera, la semejanza entre los distintos observables se hace corresponder con la base de sus análogos clásicos.

En la escala más baja de “clasicidad” se encuentran los estados correspondientes a superposición cuántica de estados macroscópicos como el ejemplo del gato de Schrödinger.

En cuanto a los estados mezcla, quedan representados por una matriz densidad y están formados por conjuntos de estados puros cada uno de los cuales ha sido preparado con cierta probabilidad. En este caso, el conjunto se podría interpretar en términos de ignorancia, pues las probabilidades no son fruto de una superposición cuántica. Ahora bien, en el caso de que se encuentre presente las superposiciones cuánticas ya no es posible interpretar la probabilidad del estado conjunto como ignorancia. Pues bien, las matrices densidad reducida que representan el estado tras la interacción con el entorno son ejemplos de este último tipo. Como acabamos de ver, se denominan mezclas impropias porque, a pesar de la apariencia exterior de mezcla clásica (e.g. $\hat{\rho}_s^{red}(t) = |a|^2|s_1\rangle\langle s_1| + |b|^2|s_2\rangle\langle s_2|$), no se pueden interpretar como ignorancia ya que sigue presente la correlación cuántica generalizada con los grados de libertad del entorno. En efecto, como acabamos de ver, los términos de interferencia sólo son aproximadamente nulos en el límite infinito de grados de libertad. Por tanto, como los estados fruto de la decoherencia son mezclas impropias, estarían bastante alejados de los estados clásicos, aunque contengan la información de todas las posibles medidas locales sobre el sistema.

4.3. Los criterios de selección de la base privilegiada.

Si la dinámica ha recaído en los estados que representan los grados de libertad del entorno sin que los estados del sistema y el aparato fueran perturbados, entonces se ha encontrado la base privilegiada del puntero [Zurek, 1981, p. 1519]. En otras palabras, parece que se debe considerar cierta estabilidad en los estados del sistema y el dispositivo de medida que debería estar garantizada por el hamiltoniano de interacción. Por eso, como veremos, la posición es la propiedad accesible más común en los objetos macroscópicos, pues el hamiltoniano de interacción entre estos sistemas y el entorno dependen de estos observables [Schlosshauer y Fine, 2007, p.131]. Claro está que, en general, la estabilidad del dispositivo de medida se debe a que hemos elegido las propiedades a medir. Es decir, el marco experimental ha fijado la base para la diagonalización que, en este caso, coincide con la base de los resultados posibles o base del puntero. La cuestión es explicar cómo se selecciona la base o propiedad - e.g. la posición, etc.- en la naturaleza.

Es importante darse cuenta de que en general no se puede atribuir la base privilegiada del puntero a los autoestados de la matriz de densidad reducida. La razón es que los autoestados de $\hat{\rho}_s^{red}(t)$ en general no son estables [Schlosshauer, 2007] pues dependen del tiempo y del estado inicial del sistema¹⁵⁷. Esto impide que sean considerados como clásicos.

¹⁵⁷En el caso de que la matriz densidad reducida sea diagonal y exista degeneración -recordemos que si el conjunto de autovectores asociados a un autovalor es mayor que la unidad se dice que el autovalor se encuentra

Por esta razón, debemos tener presente que el proceso de la decoherencia nos explica la deslocalización de la fase en el entorno que a menudo, no siempre, lleva a la selección de la base privilegiada del puntero candidata a la clasicidad. Esto se debe a que la dinámica de decoherencia no distingue entre estados¹⁵⁸. La consideración de la necesidad de introducir un proceso de selección de la base del puntero inducido por la acción del entorno (*einselection*) es una de las importantes contribuciones de Zurek [1981]. Tampoco la selección de los punteros implica la deslocalización de las fases (decoherencia).

En definitiva, a falta de un marco experimental que fije la base privilegiada del puntero en la naturaleza, en la siguiente sección se estudiarán las condiciones dinámicas que sirven para seleccionar la base privilegiada y los criterios que se proponen en la bibliografía.

4.3.1. La conmutación con el hamiltoniano de interacción

La solución para seleccionar la base privilegiada¹⁵⁹ que propone Zurek es el denominado criterio de estabilidad: en la dinámica de interacción entre el sistema y el entorno surgen los estados puntero que son aquellos que quedan más débilmente entrelazados con el entorno. O sea, lo menos perturbados en la medida. En palabras de Zurek, los más robustos. Estos serán los candidatos a los estados del “régimen cuasiclásico”. Se debe recordar que la decoherencia explica la caída de las interferencias por la deslocalización de las fases pero esto no quiere decir que seleccione de forma única las componentes de la base. Ésta es la tarea que Zurek asigna a la selección inducida por el entorno, que se basa en el criterio de estabilidad: los estados punteros del sistema serán aquellos que menos se entrelazan con el entorno¹⁶⁰. Por esta razón es necesario buscar aquellas operaciones que midan el grado de entrelazamiento.

Veamos, la interacción entre el aparato A, el sistema S y el entorno E, tiene lugar en el espacio de Hilbert $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{AS} \otimes \mathcal{H}_E$ bajo la acción del hamiltoniano $\hat{H} = \hat{H}_{AS} + \hat{H}_E + \hat{H}_{SAE}$, donde \hat{H}_{SA} o \hat{H}_E son los autohamiltonianos del sistema-aparato y del entorno respectivamente, con \hat{H}_{SAE} (o simplemente \hat{H}_{int}) el hamiltoniano de interacción. El régimen dinámico dependerá de cuál es la relación de dominio entre los distintos hamiltonianos.

Supongamos que la evolución está dominada por el hamiltoniano de interacción \hat{H}_{SAE} - esto es, las energías asociadas con \hat{H}_{SAE} son mayores que \hat{H}_{SA} o \hat{H}_E -. En el marco de la medida de Von Neumann, si $|sa_i\rangle$ y $|\epsilon\rangle$ son autoestados de \hat{H}_{SA} y \hat{H}_E respectivamente¹⁶¹, la

degenerado y la multiplicidad o degeneración coincide con la dimensión del espacio propio asociado a dicho operador-, la base producto de la decoherencia no corresponderá a la descomposición espectral de Schmidt. Pero, aunque correspondiera, en general los estados del puntero no coinciden con los estados de Schmidt. Sólo lo hacen en el caso de que la ortogonalidad sea perfecta $\langle \epsilon_i(t) | \epsilon_j(t) \rangle = 0$.

De hecho, como se verá cuando presentemos el proceso de selección inducida por el entorno, no es necesario imponer la estricta ortogonalidad de $\{|\epsilon_i\rangle\}$ para probar la ortogonalidad de los estados punteros.

¹⁵⁸ Como por ejemplo en ciertos canales ruidosos cuánticos [Nielsen y Chuang, 2000, 378-380].

¹⁵⁹ En este apartado seguimos ampliamente el tratado de [Schlosshauer, 2007, p.78-85].

¹⁶⁰ Como explica Zurek [2010], la decoherencia no siempre induce la selección y los estados pueden ser *einselected* y no producirse la decoherencia -e.g un canal perfectamente despolarizado-.

¹⁶¹ El entorno está representado por un sólo subsistema, aunque sabemos que el estado $|\epsilon\rangle$ no es más que la generalización de un número N de subsistemas del entorno con $N \rightarrow \infty$.

evolución de la interacción se sigue de:

$$e^{-it\hat{H}_{SAE}}|sa_i\rangle|\epsilon_0\rangle = |sa_i\rangle e^{-it\hat{H}_{SAE}}|\epsilon_0\rangle = |sa_i\rangle|\epsilon_i(t)\rangle \quad (4.11)$$

Los estados que no varían en la evolución con el entorno, $|sa_i\rangle$, permiten que no se altere la correlación entre sistema y aparato. O sea, no cambian durante la interacción con el entorno. Estos estados han sufrido una *einselection*, es decir su selección ha sido inducida por el entorno. Por lo tanto, los punteros serán aquellos estados de SA que a la vez son autoestados del hamiltoniano de interacción H_{SAE} . Esto significa que si escribimos la propiedad que representa el puntero del sistema SA interaccionando sobre E como el operador \hat{A} , los observables del puntero son aquellos operadores que conmutan con dicho hamiltoniano:

$$[\hat{A}, \hat{H}_{SAE}] = 0 \quad (4.12)$$

Si tenemos en cuenta que es posible la descomposición espectral de $\hat{A} = \sum_i a_i |sa_i\rangle\langle sa_i|$, donde $|sa_i\rangle$ son los autoestados del hamiltoniano de interacción. Por lo tanto, $|sa_i\rangle$ son los estados puntero y \hat{A} es la propiedad u observable asociado.

Se pueden resumir los siguientes criterios de selección de la base privilegiada:

1. $|sa_i\rangle \rightarrow$ auto-estado de \hat{H}_{int}
2. $\hat{A} \rightarrow [\hat{A}, \hat{H}_{SAE}] = 0$
3. $\hat{A} = \sum_i a_i |sa_i\rangle\langle sa_i| \rightarrow$ (observable puntero)

Si los hamiltonianos de interacción dependen explícitamente de la posición o implícitamente a través de potenciales, es normal que la base de la posición se convierta en base del puntero o de la “clasicidad” pues, en estos casos, el operador posición suele conmutar con el hamiltoniano de interacción.

Cualquier hamiltoniano de interacción \hat{H}_{int} puede expresarse en forma diagonal según $\hat{H}_{int} = \sum_i \hat{S}_i \otimes \hat{E}_i$ [Schlosshauer, 2007, p. 78]. Donde el hamiltoniano muestra explícitamente la factorización de los operadores que actúan en el sistema \hat{S} y en el entorno \hat{E} ¹⁶².

Ahora bien, si la dinámica no está dominada por el hamiltoniano de interacción sino por el hamiltoniano del sistema \hat{H}_S , es decir, si los rangos de energía contenidos en el entorno son menores que las relacionados con los rangos de energía de los autoestados del sistema¹⁶³, estamos ante el denominado límite de decoherencia. Los estados más robustos serían aquellos que conmutan con el hamiltoniano del sistema. El entorno sólo será capaz de seleccionar las constantes del movimiento del sistema. Este caso no equivale a la

¹⁶²Un ejemplo completo sobre la dinámica de la decoherencia se desarrollará en el punto dedicado a la ecuación maestra y la representación de Wigner.

¹⁶³- Éste es el régimen de energía que domina en el mundo microscópico.

inexistencia de la interacción con el entorno, pues el ambiente sigue siendo responsable de la decoherencia, o sea de la supresión de las interferencias en los autoestados de la energía, pero los estados seleccionados no son necesariamente clásicos [Landsman, 2007, p.520]

Por último, en el caso de que ninguno de los hamiltonianos domine completamente la dinámica de decoherencia, los estados privilegiados se corresponden con los denominados estados coherentes¹⁶⁴. Los estados candidatos a punteros se obtendrán atendiendo, por un lado a que el hamiltoniano de interacción domina la dinámica del estado de posición del sistema, mientras que, por el otro, el hamiltoniano del sistema es el responsable indirecto de la supresión de los solapamientos del estado del momento del sistema. Para obtener el régimen clásico, es necesario que los estados coherentes dependan de la acción de tal suerte que se pueda tomar el límite $\hbar \rightarrow 0$.

En los modelos realistas, no se encuentran con facilidad o no existen observables que conmuten con el hamiltoniano que domina la dinámica, por lo que Zurek considera otros métodos de selección, también denominados criterios de “clasicidad”(classicality) , como la distinguibilidad (distinguishability), la redundancia (redundancy) y, el que pasamos brevemente a exponer, el “tamiz de predictibilidad”(predictability sieve)[Zurek, 1993].

4.3.2. El tamiz de predictibilidad

El tamiz de predictibilidad (predictability sieve) es un algoritmo que consigue jerarquizar el grado de perturbación de los estados gracias al cálculo de la pureza del estado o de la entropía de von Neumann. Los estados candidatos a punteros serán aquellos con pureza más próxima a la unidad o los de entropía cuántica más baja.

Esencialmente la propuesta se sustancia como sigue [Zurek, 1993, p. 294]: si se prepara el sistema en estados iniciales puros $\{|\psi_i\rangle\}$, el estado así definido tras interaccionar con el entorno durante un cierto tiempo evoluciona casi siempre a un estado mezcla $\hat{\rho}(t)_{|\psi_i\rangle}^{puro} \rightarrow \hat{\rho}(t)^{mezcla}$. Ahora se calcula para cada estado el grado de pureza derivada de las propiedades de su matriz densidad¹⁶⁵ y se evalúa si la traza aplicada al cuadrado de la matriz densidad de un estado es menor o igual que la unidad ($Tr(\hat{\rho}^2) = a_i \leq 1$):

$$1. |\psi_1\rangle \rightarrow \hat{\rho}(t)_{|\psi_1\rangle} \rightarrow Tr(\hat{\rho}_1^2) = a_1$$

$$2. |\psi_2\rangle \rightarrow \hat{\rho}(t)_{|\psi_2\rangle} \rightarrow Tr(\hat{\rho}_2^2) = a_2$$

$$3. |\psi_3\rangle \rightarrow \hat{\rho}(t)_{|\psi_3\rangle} \rightarrow Tr(\hat{\rho}_3^2) = a_3$$

.....

$$n. |\psi_n\rangle \rightarrow \hat{\rho}(t)_{|\psi_n\rangle} \rightarrow Tr(\hat{\rho}_n^2) = a_n$$

¹⁶⁴Son soluciones en el espacio de las fases - esto es, en posición y momento- a la ecuación de Schrödinger del oscilador armónico que toman la forma de gaussiana . Estas soluciones respetan las relaciones de incertidumbre cuya dispersión en posición y momento son las del estado fundamental. Son especialmente importante en el límite clásico $\hbar \rightarrow 0$.

¹⁶⁵Más información en el anexo A.2 (p.245).

En el caso de que el estado se mantenga sin interaccionar con el entorno -robustez- y conserve su pureza, la traza será uno. Como es difícil que se conserve totalmente la pureza del estado inicial, una vez aplicada esta operación se pueden ordenar los estados por orden de puridad. De esta lista, los estados más puros, es decir más inmunes a la interacción con el entorno (traza más cercana a la unidad), representarán el candidato a puntero. Dicho de otro modo, el estado que representa la “clasicidad”:

$$\text{e.g. } \{1 \leq a_{75} < a_7 < a_{750} < a_{25} < a_1 < a_{150} \dots\} \rightarrow \text{el estado más robusto es } |\psi_{75}\rangle \approx 1$$

El hecho de que en la mayor parte de los modelos no se encuentren estados puros, indica que la base seleccionada no es completamente ortogonal y esto lleva a considerar que no existe una propiedad completamente definida que se corresponda con un operador autoadjunto. Con todo, sólo se requiere que la ortogonalidad sea aproximada para la percepción de las propiedades clásicas.

Para medir el grado de entrelazamiento del estado, o sea el grado de pureza y, por lo tanto, el grado de predictibilidad, como decía Zurek, se puede utilizar también la entropía de Von Neumann. Más adelante se verá que este criterio enlaza con el uso generalizado del concepto de información puesto que, en ese argot, los estados más predecibles son los que menos *información* pierden en el entorno durante su evolución [Zurek, 2007a, p. 7].

Resumiendo, hemos presentado tres criterios para fijar la base privilegiada: uno depende del hamiltoniano de interacción, otro del entrelazamiento y otro de la puridad. Los tres criterios deberían converger a la misma base privilegiada del puntero. Además, también sería conveniente que la base seleccionada fuera estable, es decir, que el remplazo de la matriz densidad del estado conjunto S+A+E por la matriz reducida se mantenga estable localmente en el tiempo para que sea candidata a representar el estado “clásico”.

4.4. Decoherencia, visualización e inteligibilidad

4.4.1. La ecuación maestra

El cálculo de la evolución temporal del operador densidad en un sistema abierto en interacción con el entorno se formula de manera análoga a la dinámica de las distribuciones de probabilidad de la física estadística para una colectividad como un gas compuesto de 10^{23} moléculas.

Ante la imposibilidad de calcular la evolución exacta de este sistema complejo¹⁶⁶, cada uno de los subsistemas se representa por un punto en el espacio de las fases¹⁶⁷ (fig. 4.1).

¹⁶⁶Pues no se tiene acceso a los valores exactos de sus condiciones iniciales.

¹⁶⁷Espacio bidimensional en el que el eje de abscisas viene representado por las coordenadas generalizadas y eje de ordenadas por los momentos generalizados. La trayectoria en el espacio fásico, el cambio de p y q con el tiempo, corresponde al movimiento del sistema.

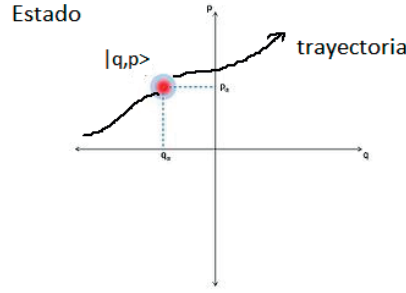


Figura 4.1: Representación del estado y su trayectoria en el espacio de las fases posición q , momento lineal p . Un punto en el caso clásico (p, q) , un punto difuminado en el caso cuántico $|p, q\rangle$.

El sistema conjunto toma la forma de una nube de puntos. La dinámica de esa colectividad está gobernada por la ecuación de Louville que afirma la conservación en el tiempo de la densidad de estados -puntos- contenidos en una región del espacio de fases (fig. 4.2) .

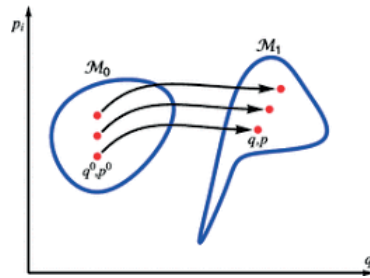


Figura 4.2: Representación del estado y su trayectoria en el espacio de las fases.

En general, no es factible solucionar analíticamente esta ecuación por lo que se aproxima gracias la denominada ecuación maestra ajustada para cada modelo.

La formulación de la teoría cuántica en el espacio de las fases¹⁶⁸ se implementa de la siguiente forma: por analogía al caso clásico, se sustituyen las distribuciones de probabilidad clásica por la distribución cuántica, mediante el operador densidad, que representará una distribución de densidad cuántica en el espacio de las fases $\rho(q, p)$ si cumple ciertas condiciones¹⁶⁹. Ahora la evolución temporal de los estados $\hat{\rho}_{SE}$ sigue la ecuación de Louville-von Neumann¹⁷⁰.

En general no se puede calcular analíticamente la matriz densidad del sistema entrelazado $\hat{\rho}_{SE}(t)$, debido, entre otros problemas, a la complejidad del entorno. De ahí que para obtener la evolución temporal de la matriz densidad reducida, que es la que porta

¹⁶⁸El principio de indeterminación no impide que la distribución en el espacio de las fases cuántico exista. La cuestión relevante es que hay infinitas $\rho(q, p)$ que cumplen estas condiciones pero, como sostiene [Ballentine, 2000, p. 407], no se ha encontrado un principio con el que se pueda obtener un operador densidad que muestre una especial significación física.

¹⁶⁹Consultar por ejemplo [Ballentine, 2000, p. 406].

¹⁷⁰ $\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = \frac{1}{i} [\hat{H}_{SE}, \hat{\rho}]$.

toda la información accesible localmente, se deben utilizar aproximaciones en función de la matriz densidad reducida inicial¹⁷¹.

La ecuación diferencial en derivadas parciales de primer orden respecto al tiempo, o ecuación maestra, representa la evolución de la matriz de densidad reducida,

$$\hbar \frac{\partial \hat{\rho}_S^{red}}{\partial t} = -i[H_S^*(t), \hat{\rho}_S^{red}(t)] + \hat{D}[\hat{\rho}_S^{red}(t)] \quad (4.13)$$

y viene gobernada por dos términos: (1) el primer de la derecha tras el igual da cuenta de la evolución lineal unitaria, cuya dinámica no depende del hamiltoniano aislado sino del perturbado por la acción del entorno $H_S^*(t)$. Si se cumple el criterio de selección de la base privilegiada, este término se anulará y la evolución temporal de la matriz densidad reducida dependerá del segundo término tras la igualdad (2) $D[\hat{\rho}_{SA}(t)]$, que es el responsable del decaimiento de las interferencias. Es decir, da cuenta de la parte no lineal o decoherente de la ecuación maestra y depende de parámetros fijados para cada modelo.

Se puede ilustrar el problema dinámico de decoherencia, por ejemplo, tomando la representación de la matriz densidad en el espacio de las posiciones para un modelo cuántico sencillo: la dispersión monodimensional¹⁷² de una partícula sumergida en un entorno compuesto por partículas ambientales.

Al seleccionar la base de representación de las posiciones, deseamos describir la localización de la partícula diana.

El estado se representa mediante dos paquetes de onda localizados a una distancia $\delta x = |x - x'|$ según la matriz densidad, $\rho(x', x) \equiv \langle x' | \tilde{\rho} | x \rangle$, que no es más que el valor medio del operador densidad.

En términos de la función de onda, el estado de superposición coherente (fig. 4.3) será,

$$\Psi(x) = (\phi^+(x) + \phi^-(x)/2)^{1/2} \quad (4.14)$$

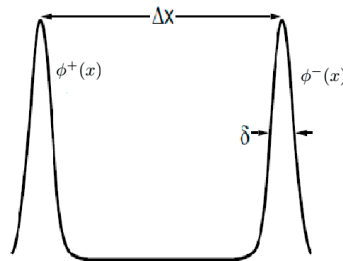


Figura 4.3: Estado de superposición de las posiciones para una partícula. Tomado de [Zurek, 2002].

y correspondiente operador densidad,

¹⁷¹ $\hat{\rho}_{SA}^{red}(t) = \hat{V}(t)\hat{\rho}_S^{red}(0)$, siendo el operador $\hat{V}(t)$ una cartografía dinámica [Schlosshauer, 2007, p. 153-170].

¹⁷² Para detalles sobre la derivación de este ejemplo consultar [Schlosshauer, op.cit., 153-170] o [Zurek, 2002].

$$\hat{\rho}(x, x') = \Psi(x)\Psi(x')^* \quad (4.15)$$

Si lo introducimos en la ecuación 4.13, evolucionará gracias a la dinámica gobernada por el hamiltoniano¹⁷³, según:

$$\frac{\partial \hat{\rho}_S(x, x', t)}{\partial t} = \frac{-i}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2}{\partial^2 x'} \right) \hat{\rho}_S(x, x', t) - \Lambda(x - x')^2 \hat{\rho}_S(x, x', t) \quad (4.16)$$

Ésta es la ecuación maestra que describe la evolución del operador densidad reducida para este modelo de dispersión. Se pueden apreciar de nuevo el término líneal, primero después del igual, que se anulará cuando los observables del puntero conmuten con el hamiltoniano de interacción, y el responsable del decaimiento de las interferencias con el tiempo:

$$\frac{\partial \hat{\rho}_S(x, x', t)}{\partial t} = -\Lambda(x - x')^2 \hat{\rho}_S(x, x', t) \quad (4.17)$$

donde Λ es la constante de dispersión para longitudes de onda que condicionará el tiempo de decoherencia.

En efecto, las interferencias cuánticas entre los dos paquetes de ondas se aprecian como oscilaciones, que dependen en gran medida de la separación entre los paquetes de la posición Δx , como muestra la fig.4.4.

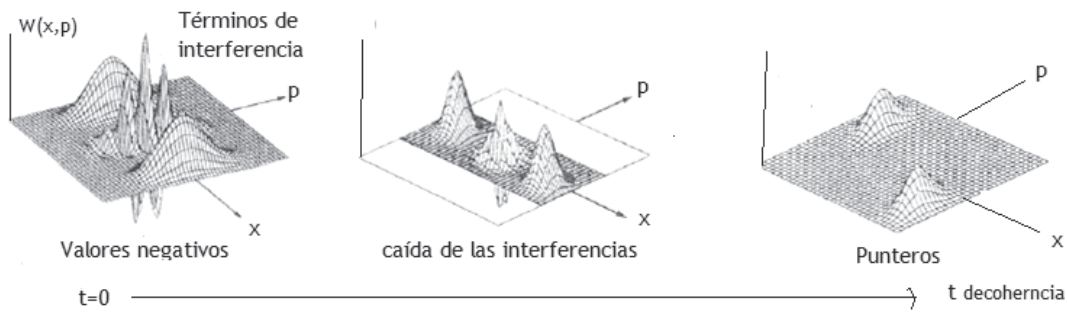


Figura 4.4: Evolución de la distribución de Wigner en el tiempo de decoherencia. Imagen adaptada de Zurek [2002].

Cuanto más lentas sean dichas oscilaciones, más rápida será la caída de los términos de interferencia y el consecuente comportamiento cuasi-clásico. Dicho de otra forma, si el tiempo de variación dinámica interna del sistema es mayor que el tiempo de escala, los términos de interferencia se anularán de manera exponencial con el tiempo,

¹⁷³ $H(x, p) = \frac{-i}{2m} \frac{d^2}{dx^2}$.

$$\hat{\rho}_S(x, x', t) = \hat{\rho}_S(x, x', 0)e^{-\Lambda(\Delta x)^2 t} \quad (4.18)$$

Por tanto, el tiempo de decoherencia es inversamente proporcional a la constante de dispersión sobre la distancia entre los dos paquetes gaussianos:

$$\tau_{\Delta x} = \frac{1}{\Lambda(\Delta x)^2} \quad (4.19)$$

Si el sistema es una partícula de tamaño $10^{-3}cm$ a temperatura ambiente en un baño de fotones, el tiempo de caída de las interferencias será de aproximadamente $10^{-18}cm$, un orden de magnitud por debajo de los errores de los relojes más precisos [Schlosshauer, op. cit., 134].

En el caso más general, Zurek y colaboradores utilizan la representación de Wigner del operador densidad¹⁷⁴ para visualizar el estudio de la transición cuántico-clásico en el espacio de las fases [Zurek, 2002]. Consiguen también una imagen de la supresión de las correlaciones posición-momento y de la caída de las interferencias cuánticas al modo de la representación clásica. Decimos al modo clásico porque este autor es consciente de que la representación de Wigner no constituye una distribución de probabilidad clásica puesto que, por lo general, esta distribución puede tomar valores negativos¹⁷⁵.

Si la selección de la base privilegiada no es exacta, como vimos, se calcula de manera aproximada gracias al tamiz de predictibilidad, que explica la aparición de la estructura clásica en el espacio de las fases: los puntos -máximos del paquete gaussiano- posición y momentos ordenados secuencialmente representarán las trayectorias clásicas “cuasi-reversibles” [Zurek, 2003, p. 717].

A pesar de no ser una distribución de probabilidad clásica, la distribución de Wigner en el espacio de las fases facilita un modelo inteligible (visualizable) de transición entre las representaciones cuántica y clásica. No obstante, incluso en el caso macroscópico, las mezclas son impropias, o sea, sigue presente la superposición cuántica y no se han obtenido resultados definidos sino los posibles estados solución.

¹⁷⁴

$$\rho_{wigner}(p, q) = (2\pi\hbar)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \langle q - \frac{1}{2}y | \rho | q + \frac{1}{2}y \rangle e^{\frac{ipy}{\hbar}} dy \quad (4.20)$$

¹⁷⁵A pesar de que en el caso de estados puros representados por paquetes de onda gaussianos - cuyos grados de libertad son posición del sistema x y la variable conjugada es el momento p - las funciones de Wigner son positivas o cero. Desgraciadamente, la situación cambia cuando queremos construir un gato de Schrödinger de dos paquetes gaussianos, pues su superposición (e.g. $\phi^{\pm}(x) \sim \exp\{(x \pm \Delta x/2)^2/4\delta^2\}$) muestra dos picos gaussianos y dos términos de interferencia que posibilitan que la función de Wigner tome valores negativos por lo que no puede ser considerada una distribución de probabilidad [Ballentine, 2000, p. 411]. Ni siquiera en el caso macroscópico la función de Wigner se puede considerar una distribución de probabilidad aunque aparezcan los dos máximos, pues si Δx es muy grande, la amplitud de los términos de interferencia no decae [Ballentine, 2000, p. 412]. Se puede consultar la posibilidad de que la función de Wigner no tome valores negativos para experimentos tipo EPR. [Bell, 1990, pp. 267-273]. Para una aproximación experimental con fotones, consultar [Casado et al, 2002].

Conclusiones

En esta sección hemos presentado el marco general sobre el que desarrollaremos el análisis del Darwinismo Cuántico y de la interpretación existencial.

Hemos comenzado por presentar el concepto de teoría según la filosofía de la ciencia. Se ha concluido que en la tradición filosófica se ha distinguido entre el formalismo de la teoría y la interpretación, entendiendo por tal aquella que conecta los conceptos formales con la experiencia.

Entre las distintas concepciones se ha optado por la de orientación pragmática en la que los modelos son mediadores entre las teorías y el mundo. Para desarrollar su labor, los modelos deben ser parcialmente independientes de las primeras.

El esquema anterior se puede aplicar a uno de los problemas más candentes de la filosofía de la física, a saber, la interpretación de la teoría cuántica. Hemos distinguido entre formalismo (teoría), y el modelo. El primero obedece a los principios de (1) completud, (2) evolución líneal y (3) composición de sistemas que aplicados a la representación matemática de los sistemas físicos conduce al problema de la indefinición de los resultados. Ésta sería una de las maneras en las que se presenta el problema de la medida.

Si se desean obtener los resultados empíricos, es necesario el modelo para conectar el formalismo con el mundo. Éste se basa en el principio de repetibilidad y se sustancia en un algoritmo dividido en dos partes, a saber: (4) el colapso o reducción y (5) la regla de Born para el cálculo de las probabilidades.

Actualmente, algunos autores dividen el problema de la medida en dos, a saber: el pequeño problema de la medida, su solución debe establecer cómo se selecciona la base y por qué no se pueden observar las interferencias, y el problema grande de la medida, que requiere explicitar cómo se obtienen los resultados definidos.

Si se parte de una descripción puramente cuántica, la interacción entre sistema y dispositivo de medida no puede considerarse aislada del entorno. Ésta sería una útil idealización, pero el único sistema cerrado es el universo el completo. Por eso, se plantea el mecanismo de decoherencia física que implica la deslocalización de las fases en los múltiples grados de libertad del entorno. Este proceso es una mera extensión del formalismo cuántico y, por tanto, es independiente de cualquier interpretación. El mecanismo de decoherencia se implementa formalmente mediante la operación de traza parcial que es una operación matemática de “grano grueso”, que permite describir la transición desde el estado puro

de sistema compuesto a la matriz de densidad reducida. De la dinámica desplegada por la interacción sistema entorno los estados cuánticos candidatos a la clasicidad han sido seleccionados por su robustez ante la interacción con el entorno *einselection*. Se debe tener presente que no siempre la decoherencia implica selección de los estados del puntero y, a la inversa, la selección de los estados puntero no siempre se ve acompañada por la decoherencia. Los dos procesos, fruto de las relaciones entre el entorno y el sistema, son independientes aunque suelen presentarse juntos. Por último, la transición entre el mundo cuántico y el cuasi-clásico se implementa matemáticamente para cada caso particular mediante la ecuación maestra. Ésta es la verdadera ecuación evolutiva de los estados cuánticos hacia la representación aproximadamente clásica.

No obstante, la matriz de densidad reducida no puede interpretarse como el estado del sistema tras la medida puesto que faltaría incorporar la información contenida en las correlaciones diluidas en el entorno. De ahí que el programa de decoherencia de Zurek y colaboradores intente ampliar su exploración de la relación entre los sistemas y el entorno para dar cuenta de nuestra experiencia.

Parte III

EL OBJETIVO: EL DARWINISMO CUÁNTICO

Introducción

En esta parte del trabajo expondremos detalladamente el programa de investigación del darwinismo cuántico con el objetivo de fijar claramente los distintos conceptos y relaciones que se despliegan en este modelo para poder establecer el grado de plausibilidad de la analogía darwinista.

Después de la descripción del formalismo de decoherencia que se ha llevado a cabo en el capítulo anterior, Zurek piensa que es imprescindible justificar la mecánica cuántica exclusivamente en la teoría y en el postulado de repetibilidad. Esta cuestión se abordará en la sección 5.1. Zurek advierte que la estrategia para demostrar la emergencia de la clasicidad debe dejar en paréntesis los resultados de la decoherencia [Zurek, 2009]. En esencia el problema estriba en que la operación de promediar sobre los grados de libertad del entorno, necesaria para calcular la matriz de densidad reducida, depende de la regla de Born y, por lo tanto, de postular el colapso [Zurek, 2014, p.45]. Por eso en la sección 5.2, se muestra que la regla de Born se puede deducir de los postulados matemáticos de la teoría¹⁷⁶, del axioma de predictibilidad de las medidas y de asumir ciertas condiciones de simetría.

En Zurek [2004, 2007a, 2009, 2014], se tratan los dos conceptos fundamentales de estas dos primeras secciones, a saber: el mecanismo de selección inducida por el entorno (*einselection*) que explica, sin acudir a decoherencia, la limitación de las medidas de todos los estados posibles a un pequeño conjunto de estados ortogonales en el espacio de Hilbert y la simetría de invariancia asistida por entrelazamiento (*envariance*) que posibilita la deducción de la regla de Born de las probabilidades.

Estos dos principios son fundamentales para entender la analogía darwinista: la selección inducida por el entorno se asocia al concepto de “copia” y, por lo tanto, a un “tipo de reproducción” del algoritmo darwinista. También es necesario conocer si las dos teorías coinciden en la explicación sobre el origen de la aleatoriedad y si soportan una interpretación similar de las probabilidades.

Una vez salvados estos dos obstáculos, Zurek considera que ya es posible utilizar las herramientas formales del mecanismo de decoherencia. Ahora bien, como el programa de decoherencia no soluciona el problema de la medida, aspecto que se tratará en la sección 5.3, explicaremos, en el apartado 5.4, cómo Zurek y colaboradores se apoyan en el formalismo

¹⁷⁶Esta misma necesidad se encuentra en la interpretación de Everett que sirve de inspiración en la formulación de Zurek [2009, p.9].

derivado de la teoría cuántica de la información para buscar el rastro que el sistema ha dejado en el entorno. La información de los estados más estables ante la decoherencia ha sido amplificada en el entorno que, a modo de canal de información, sirve para que los observadores conozcan las propiedades del sistema. Este proceso de transferencia masiva de la información se conoce como Darwinismo Cuántico.

Es conveniente aclarar en este punto que, en la literatura, el concepto de Darwinismo Cuántico se aplica tanto para este proceso final antes referido como para todo el programa de investigación liderado por Zurek.

A pesar de la eficacia del Darwinismo Cuántico para conseguir la proliferación de la información en el ambiente, este mecanismo no puede por sí solo resolver el problema de los resultados ni explicar la imagen manifiesta del mundo. Por eso, en última instancia, Zurek y colaboradores necesitan decantarse por añadir algún postulado interpretativo.

La interpretación existencial, expuesta en el capítulo 6, pretende convertirse en una solución que funcione como puente entre la interpretación de Copenhague-Bohr y la del estado relativo de Everett. Tras analizar este punto en la sección 6.1 y como explicaremos en el punto dedicado al estudio de la naturaleza de los estados cuánticos 6.2, la ambigüedad que muestra Zurek para asumir un compromiso ontológico claro dificulta seriamente el establecimiento de una analogía material entre el Darwinismo Cuántico y la selección natural.

Capítulo 5

El Darwinismo Cuántico

5.1. Repetibilidad, saltos cuánticos y el concepto de copia

En [Zurek, 2007b] se expone la estrategia para explicar -desde los postulados de complejidad, superposición y linealidad- los saltos cuánticos -*discretización*- y la necesidad de que los observables vengan representados por operadores hermíticos. Todo ello, sin acudir al mecanismo de decoherencia.

El pilar de la demostración descansa en el postulado físico de predictibilidad que restringe las enormes posibilidades de la estructura matemática a los estados ortogonales. Este postulado significa que no podemos permitir que el estado cambie. Con más precisión: lo que no puede cambiar son los productos escalares para que se produzca la ruptura de la simetría derivada de los axiomas matemáticos¹⁷⁷.

Supongamos una interacción que no perturbe el estado del sistema o del aparato de medida de forma tal que en caso de repetir la medida lleguemos al mismo resultado. Si los estados $|u\rangle \in \mathcal{H}$ y $|v\rangle \in \mathcal{H}$ del sistema interactúan con el estado inicial del aparato $|A_0\rangle$, la evolución de los sistemas será unitaria hasta conseguir la perfecta alineación entre los estados del sistema y los punteros del aparato:

1. $|u\rangle|A_0\rangle \xrightarrow{U} |u\rangle|A_u\rangle$
2. $|v\rangle|A_0\rangle \xrightarrow{U} |v\rangle|A_v\rangle$

Una superposición de los dos estados también es estado del sistema, por lo que:

$$a|u\rangle + b|v\rangle|A_0\rangle \xrightarrow{U} a|u\rangle|A_u\rangle + b|v\rangle|A_v\rangle \quad (5.1)$$

¹⁷⁷ Si nos fijamos en la evolución de los sistemas cuánticos formulada en el postulado (2), la simetría dinámica está relacionada con la relación que existe entre la evolución unitaria y el requerimiento de la hermiticidad según $\hat{U} = e^{i\hat{H}}$ con \hat{U} operador unitario y \hat{H} operador hermítico. Si tenemos un operador hermítico \hat{B} tal que conmuta con el hamiltoniano $[\hat{B}, \hat{H}] = 0$, entonces \hat{B} es una cantidad conservada y $\hat{T}(s) = e^{is\hat{B}}$ es una simetría para cualquier valor real de s . Las rotaciones en un tiempo t son el ejemplo clásico.

Como es sabido, la transformación unitaria conserva los productos escalares, la norma, los ángulos y los cosenos entre vectores del espacio de Hilbert \mathcal{H} . Por lo tanto:

$$\langle u|v\rangle\langle A_0|A_0\rangle = \langle u|v\rangle\langle A_u|A_v\rangle \quad (5.2)$$

El término $\langle A_0|A_0\rangle = 1$ y nos queda:

$$\langle u|v\rangle = \langle u|v\rangle\langle A_u|A_v\rangle \quad (5.3)$$

Si estamos tentados a simplificar por $\langle u|v\rangle$, la medida no habría tenido lugar, pues $\langle A_u|A_v\rangle = 1 \rightarrow |A_u\rangle = |A_v\rangle$. No distingue entre los dos estados inicialmente diferentes.

La única posibilidad que resta es que no se pueda simplificar puesto que el producto escalar se anula $\langle u|v\rangle = 0$. Esto significa que, para que tengamos resultados de la medida repetibles, éstos quedan restringidos a los estados ortogonales $|u\rangle \perp |v\rangle$.

Zurek concluye que la naturaleza de la evolución selecciona el estado repetible. Si los autovalores son reales, los observables que tienen autoestados ortogonales son hermíticos. De esta forma se demuestra la primera parte del postulado de colapso (4.1) del algoritmo de medida (p. 80). Esto justifica los saltos cuánticos y “la copia” que representa la transferencia de información en el entorno. Es importante tener en cuenta dos cuestiones relacionadas: (1) en este proceso no se ha producido “el colapso” de la función de onda en sentido estricto y (2) la exigencia de repetibilidad, que es difícil de cumplir a escala de sistemas microscópicos debido a que las medidas suelen ser destructivas, es la clave para entender la robustez o estabilidad de las medidas de los estados macroscópicos a pesar de que puedan variar los microestados [Zurek, 2014, p.46].

La cuestión ahora es demostrar que este resultado, esperable en el caso de los dispositivos de medida, pues se diseñan para distinguir los distintos resultados, puede extenderse a la naturaleza. Zurek sigue la misma estrategia [Zurek, 2014, p. 4] en las interacciones entre sistema y entorno. Si el sistema S $|\psi\rangle_S \in \mathcal{H}_S$ se representa en la base $|s_i\rangle$ y el entorno E $|\psi\rangle_E \in \mathcal{H}_E$ con representación en la base $|\epsilon_i\rangle$, la interacción entre el sistema y el entorno sigue una evolución unitaria:

$$|\psi\rangle_S|\epsilon_0\rangle = \left(\sum_i a_i|s_i\rangle\right)|\epsilon_0\rangle \xrightarrow{U} \sum_i a_i|s_i\rangle|\epsilon_i\rangle = |\psi\rangle_{SE} \quad (5.4)$$

Si tomamos la norma a los dos lados la condición de igualdad viene dada por:

$$\text{Re} \sum_{i,j} a_i^* a_j \langle s_i|s_j\rangle = \text{Re} \sum_{i,j} a_i^* a_j \langle s_i|s_j\rangle \langle \epsilon_i|\epsilon_j\rangle \quad (5.5)$$

Para cualquier estado en \mathcal{H}_S y fase de coeficiente complejo, la ecuación se simplifica a:

$$\langle s_i|s_j\rangle(1 - \langle \epsilon_i|\epsilon_j\rangle) = 0 \quad (5.6)$$

La condición de ortogonalidad es la única solución permitida para que se haya realizado la medida: $\langle \epsilon_i|\epsilon_j\rangle = 0$.

Aunque parezca que el resultado obtenido se debe a la pureza del estado inicial del entorno, recordamos que siempre se puede purificar el estado mezcla del entorno en un espacio de Hilbert mayor¹⁷⁸. No obstante, también se puede demostrar que la evolución unitaria debe respetar los productos escalares de los operadores densidad [Zurek, 2013b].

Para Zurek, copiar información en el entorno significa que en la evolución dinámica durante la interacción se ha correlacionado el sistema con el entorno de tal suerte que la única información accesible en gran cantidad es la de los estados del entorno que son mutuamente ortogonales. Si la copia fuera exacta, se violaría el teorema que demuestra la imposibilidad de clonar un estado desconocido¹⁷⁹. Pues esto significaría que podemos hacer infinitas copias de ese estado y medir en cada una la propiedad que estimemos, independientemente de si son propiedades compatibles o incompatibles, y así averiguar cualquier estado cuántico. Por eso, la copia no puede ser perfecta, salvo que el estado sea perfectamente conocido. Esto nos conduce a focalizar la atención sobre lo que permanece invariante: los productos escalares. Si los estados del sistema cambian durante la interacción de forma sensible:

$$|\psi\rangle_S |\epsilon_0\rangle = \left(\sum_i a_i |s_i\rangle \right) |\epsilon_0\rangle \xrightarrow{U} \sum_i a_i |\tilde{s}_i\rangle |\epsilon_i\rangle \quad (5.7)$$

La condición de invariancia sería:

$$\text{Re} \sum_{i,j} a_i^* a_j \langle s_i | s_j \rangle = \text{Re} \sum_{i,j} a_i^* a_j \langle \tilde{s}_i | \tilde{s}_j \rangle \langle \epsilon_i | \epsilon_j \rangle \quad (5.8)$$

y, por lo tanto, si $\langle \tilde{s}_i | \tilde{s}_j \rangle = \langle s_i | s_j \rangle$ llegamos a la misma conclusión que en el caso anterior aunque ahora los estados no son estrictamente repetibles y por lo tanto no violan el teorema de no clonación. Por supuesto, si cambia el valor del producto escalar entonces no son repetibles en absoluto y esto quiere decir que no se respeta el axioma de conexión con la física.

Una de las cuestiones que más nos interesará para establecer la analogía con la selección natural en biología es que, según [Zurek, 2007a, p. 5], la relación que existe entre los estados del sistema antes de la interacción (progenitores) y los posteriores a la interacción (su descendencia) es la preservación del producto escalar durante la transferencia de información. Ésta es la forma en que se pueden producir cadenas de transferencia de

¹⁷⁸Es importante recordar que la teoría cuántica se puede presentar mediante el enfoque más general posible (Ver apéndice A.3) en un espacio de Hilbert “pequeño”, en el que los estados son mezcla y están representados por matrices densidad, las transformaciones son TPCPM y las medidas se realizan mediante superoperadores POVM. Ahora bien, gracias a los procedimientos de purificación, al teorema de dilatación de [Stinespring, 1955] y al teorema de extensión de [Naimark, 1943], podemos pensar los estados mezcla en términos de estados puros entrelazados de espacios de Hilbert mayores, las evoluciones irreversibles se pueden representar como operadores unitarios en sistemas mayores y las medidas no proyectivas como medidas proyectivas en espacios de Hilbert “grandes”.

¹⁷⁹Teorema de no clonación [Wootters y Zurek, 1982].

información¹⁸⁰ entre distintos sistemas como en el caso que veremos del Darwinismo Cuántico:

$$|v\rangle|A_0\rangle|B_0\rangle\dots|E_0\rangle \rightarrow |\tilde{v}\rangle|A_v\rangle|B_0\rangle\dots|E_0\rangle \rightarrow \dots \rightarrow |\tilde{v}\rangle|\tilde{A}_v\rangle|\tilde{B}_v\rangle\dots|E_v\rangle \quad (5.9)$$

$$|u\rangle|A_0\rangle|B_0\rangle\dots|E_0\rangle \rightarrow |\tilde{u}\rangle|A_u\rangle|B_0\rangle\dots|E_0\rangle \rightarrow \dots \rightarrow |\tilde{u}\rangle|\tilde{A}_u\rangle|\tilde{B}_u\rangle\dots|E_v\rangle \quad (5.10)$$

Los distintos solapamientos de los productos escalares, se deben conservar. Esto significa que:

$$\langle u|v\rangle = \langle \tilde{u}|\tilde{v}\rangle \langle \tilde{A}_u|\tilde{A}_v\rangle \langle \tilde{B}_u|\tilde{B}_v\rangle \dots \langle \tilde{E}_u|\tilde{E}_v\rangle \quad (5.11)$$

Si aplicamos la operación de norma a los dos lados de la igualdad y tomamos logaritmos del módulo del producto escalar,

$$\ln|\langle u|v\rangle|^2 = \ln|\langle \tilde{u}|\tilde{v}\rangle|^2 + \ln|\langle \tilde{A}_u|\tilde{A}_v\rangle|^2 + \ln|\langle \tilde{B}_u|\tilde{B}_v\rangle|^2 + \dots + \ln|\langle \tilde{E}_u|\tilde{E}_v\rangle|^2 \quad (5.12)$$

el término a la izquierda de la igualdad quedará fijo y, en el caso de que los estados iniciales no sean perpendiculares, se perderá información en cada eslabón de la cadena. Pero si los estados son ortogonales, no se deteriorará la información transferida en cada eslabón pues $\ln|\langle u|v\rangle|^2 = -\infty$, lo que permitirá la distinguibilidad:

En conclusión, como afirma Zurek [Zurek, 2007a, p. 7], la dinámica de los sistemas abiertos consigue la ruptura de la simetría unitaria y selecciona los estados mediante la transferencia de información al entorno. La base privilegiada será aquella que no pierde información en este proceso. Es decir, son estados que no son perturbados por el proceso de transferencia de la información y, por lo tanto, son más predecibles. En el principio de no perturbabilidad descansa el mecanismo de selección inducida por el entorno de los estados punteros. En general los punteros seleccionados por el criterio de estabilidad no coinciden con los estados propios de la matriz de densidad reducida, aunque puedan encontrarse próximos a ellos cuando el proceso de decoherencia se complete. La base privilegiada y las propiedades asociadas clásicas seleccionadas por el criterio de predictibilidad - que en el caso de los dispositivos de medida queda definida por el diseño del aparato clásico- han sido seleccionadas por la dinámica abierta del sistema.

¹⁸⁰Cadenas siguiendo la evolución líneal de la medida de Von Neumann.

5.2. La regla de Born desde las simetrías de entrelazamiento

Como hemos visto, si se parte de un esquema en el que el mundo es fundamentalmente cuántico también se debe explicar el origen y naturaleza de las probabilidades. En la sección anterior, Zurek demostró que los saltos cuánticos se derivan de la ortogonalidad de los valores de los productos escalares posibles que son 0 ó 1 y no ha sido necesario el uso del postulado de las probabilidades. El siguiente paso en el programa de Zurek y colaboradores es demostrar cómo se relacionan las probabilidades con los estados (justificación de la regla de Born). Recordemos que la operación de traza para conseguir la matriz de densidad reducida y la interpretación de ésta como una mezcla va a depender de la regla de Born, que es el postulado 5 del algoritmo de medida (p. 113).

Explicar estas dos cuestiones dentro de la teoría cuántica significa ir más allá del planteamiento matemático formal que deduce la regla de Born a través de una medida aditiva en los espacios de Hilbert [Gleason, 1957]. Es necesario encontrar una justificación física de la naturaleza probabilística de los resultados. Para satisfacer esta justificación, Zurek propone cierta condición de simetría que denomina invariancia asistida por entrelazamiento o *envariance*, que deriva del papel que juegan las fases en el estado de superposición.

Zurek acude al enfoque laplaciano de la probabilidad, que establece la naturaleza de las probabilidades como medida de nuestra ignorancia. Ésta se basa en la suposición de un mundo determinista donde rige el principio de razón suficiente, extendido al caso de las acciones que se juzgan indiferentes [Laplace, 1947, p. 12]. Por esta razón, las probabilidades no pueden ser intrínsecas a la naturaleza -esto es, objetivas- sino que tienen que ser consecuencia de nuestra ignorancia.

En el caso cuántico, el argumento de la indiferencia se convierte en el principio de simetría en el que se basa la deducción de la regla de Born. Para transitar del principio de indiferencia al principio de simetría cuántico, Zurek se apoya en la analogía clásica en la que un jugador de cartas toma dos naipes y, sin identificarlos, después de intercambiar el orden de los dos, elige uno al azar. Los dos eventos, el anterior al intercambio y el posterior, tienen las mismas probabilidades. Esta probabilidad está asociada a la ignorancia del jugador y se define mediante la equiposibilidad. En el caso de pares de naipes cuánticos que muestran entrelazamiento, la transformación que deja invariante el estado del sistema bipartito es el denominado intercambio por entrelazamiento (*entanglement swapping*)¹⁸¹. Por lo tanto, dicha transformación está asistida por una propiedad exclusivamente cuántica. Esta simetría de tipo cuántico se denomina envariancia (*envariance*), o sea, invariancia asistida por entrelazamiento.

La demostración de la regla de Born y su consecución depende de dos cuestiones principales:

¹⁸¹Consultar la introducción al formalismo (A.1.5).

1. Las fases de los coeficientes de Schmidt no son relevantes.
2. Amplitudes iguales implican probabilidades iguales, basadas en posibilidades iguales.

Según Zurek [2004], es posible definir la simetría de entrelazamiento de los estados cuánticos o invariancia asistida por entrelazamiento (*envariancia*) como sigue: sea un sistema entrelazado compuesto por el sistema objetivo S y su entorno E , cuyo estado puro está descompuesto en una base de Schmidt con autovalores $a_i \in \mathbb{C}$,

$$|\psi_{SE}\rangle = \sum_i a_i |s_i\rangle |\epsilon_i\rangle \quad (5.13)$$

si se puede intervenir localmente en el sistema S , mediante una transformación unitaria $u_s = \sum_k \exp(i\phi_k) |s_k\rangle \langle s_k|$ según $\hat{U}_s = u_s \otimes \mathbb{I}_\epsilon$ con \mathbb{I}_ϵ la transformación identidad actuando en el entorno, y esa operación se puede revertir mediante otra transformación unitaria que actúa sobre el entorno $u_\epsilon = \sum_k \exp(-i\phi_k) |\epsilon_k\rangle \langle \epsilon_k|$ según $\hat{U}_\epsilon = u_\epsilon \otimes \mathbb{I}_s$ donde \mathbb{I}_s es la transformación identidad actuando sobre el sistema, tal que el estado conjunto $|\psi_{SE}\rangle$ quede invariante bajo la transformación u_s ,

$$|\psi_{SE}\rangle = U_\epsilon(U_s |\psi_{SE}\rangle) \quad (5.14)$$

entonces se dice que se da una invariancia asistida por entrelazamiento o *envariancia*. Con otras palabras, la transformación u_s es simplemente una rotación de las fases $\exp(i\phi_k)$ de los coeficientes a_k mediante la actuación sobre el sistema S . Como las fases en un sistema entrelazado no son propiedades locales, se puede hacer la transformación opuesta u_ϵ - esto es, rotar en sentido contrario la fase $\exp(-i\phi_k)$ - operando sobre el entorno.

Por lo tanto, los estados y las probabilidades del sistema sólo dependen de los coeficientes de Schmidt y no de las fases. Esto quiere decir que las fases no son propiedad sólo de S sino de SE .

Ahora, asumamos la condición de simetría que es la clave de la demostración: si los N coeficientes son iguales, esto es, si tienen el mismo valor absoluto $|a_i| = |a_k|$, $\forall i, k$:

$$|\psi_{SE}\rangle \propto \sum_i |s_i\rangle |\epsilon_i\rangle \quad (5.15)$$

Los intercambios son *envariantes* cuando los coeficientes de Schmidt tienen el mismo valor absoluto. Si en esta situación imponemos la normalización del vector de estado $|\psi_{SE}\rangle \propto \sum_i |s_i\rangle |\epsilon_i\rangle$, la probabilidad total será uno y la probabilidad de cada uno de los estados de Schmidt será $p_k = 1/N \forall k$. Es decir, un observador del sistema S aprecia la igualdad de las probabilidades de cada uno de los estados $|s_i\rangle$ con $i = 1, \dots, n$. En consecuencia, “la simetría de entrelazamiento permite probar que iguales amplitudes implican iguales probabilidades” [Zurek, W.H., 2011, p. / 417].

La demostración asume ciertas condiciones implícitas que han sido investigadas en [Schlosshauer y Fine, 2005]:

1. La correlación entre sistema y entorno es uno a uno $|s_k\rangle \rightarrow |\epsilon_k\rangle$. En otros términos, se sigue el vínculo autovalor-autovector (*e-link*).
2. Las probabilidades asociadas a los estados resultado $|s_k\rangle$ y $|\epsilon_k\rangle$ de cada sistema individual, son función de las propiedades locales de cada sistema que se determinan exclusivamente mediante el vector de estado conjunto $|\psi_{SE}\rangle$.
3. Como sólo de las probabilidades se derivan probabilidades, en un estado de Schmidt entrelazado los estados resultado, $|s_i\rangle$ y $|\epsilon_i\rangle$, son equiprobables $p(|s_i\rangle; \psi_{SE}) = p(|\epsilon_i\rangle; \psi_{SE})$.
4. Cuando se intercambian los estados se intercambian las probabilidades.
5. Cuando los estados del sistema no cambian bajo cualquier unitaria en una parte del subespacio de Hilbert, las probabilidades de cualquier conjunto de bases de estados son iguales¹⁸².

A estas condiciones se debe agregar que si las probabilidades son epistémicas las equiprobabilidades deberían ser ónticas para que no se incurriera en una petición de principio en la definición de las probabilidades.

Como es sabido, cuando dos sistemas se encuentran perfectamente entrelazados, en principio¹⁸³, es posible conocer con certeza el estado cuántico del sistema entrelazado completo e ignorar al mismo tiempo los estados de los componentes. La incertidumbre en este caso se encuentra en las partes del sistema entrelazado y no en el estado total. En otras palabras, la incertidumbre es sobre la información local pero no sobre el estado global conjunto. Por eso, Zurek afirma que las probabilidades así presentadas tienen carácter objetivo pues no parten de la ignorancia, ya que el sistema completo se conoce con certeza [Zurek, 2007a, p. 11]. Esto se debe a que el estado producto tensorial del sistema compuesto muestra simetría objetiva cuando todos los eventos agotan todas las posibilidades [Zurek, W.H., 2011, p. 425].

La demostración de la regla de Born debe extenderse a los casos de coeficientes desiguales, pues el intercambio por entrelazamiento afectará a los coeficientes y por lo tanto llevarían el estado inicial a uno diferente, no cumpliéndose la condición de invariancia. Zurek reduce el caso de coeficientes diferentes al caso de equiprobabilidades, gracias a la utilización de un entorno auxiliar que, al interaccionar con el primer entorno, es capaz de reducir el caso general al de coeficientes iguales [Zurek, 2007a, p. 11]. Ésta es la conocida técnica de purificación de estados mediante entrelazamiento con un entorno auxiliar que permite trabajar con estados puros, operaciones unitarias y medidas proyectivas en espacios de Hilbert mayores.

¹⁸²Según [Schlosshauer y Fine, 2005], se puede cuestionar la plausibilidad física de esta condición.

¹⁸³[Schlosshauer y Fine, 2005] sostienen que no queda claro cómo se puede establecer ese conocimiento exacto del estado compuesto antes de la medida. Ni cómo la invariancia de intercambio lleva a la equiprobabilidad de los posibles resultados.

Finalmente, Zurek [2003] analiza el significado de las probabilidades y concluye que están relacionadas con eventos potenciales futuros de los que sólo uno se realizará. Afirmar explícitamente que no es necesaria la existencia de las posibles alternativas: el observador sabe que hay tantas posibles soluciones como autovalores del observable de las que sólo se obtendrá una [Zurek, W.H., 2011, p. 425]. Por esta razón, aunque se puedan dar todos los casos, cada observador recuerda una determinada secuencia de eventos. El conteo se refiere al número de los potenciales eventos mutuamente excluyentes que son invariantes ante intercambio por entrelazamiento y no a los eventos reales de la estadística clásica. Por esta razón no se les puede asociar una frecuencia relativa. Así, siguiendo la línea de Everett [1957], “la forma de recuperar las frecuencias se lleva a cabo considerando las ramas en la que ciertos eventos han sucedido” [Sauders et al., 2010, p. 427]. Finalmente, las probabilidades se relacionan con la suposición de que el observador ha sido guiado por la información completa del estado antes de realizar la medición sobre el estado de su memoria futuro. Es lógico que en la invariancia por intercambio de los estados del sistema se encuentren equiprobabilidades [Zurek, 2003, p. 755].

Se han presentado críticas [Mohrhoff, 2004] ante este planteamiento y la consecuente demostración. El problema de fondo es demostrar cómo se asocian los estados cuánticos a las probabilidades. Para Zurek, esta ligadura estado-probabilidad se sigue de la simetría cuántica de los estados puros con coeficientes constantes. El hecho de que las propiedades asociadas a los distintos estados resultado no se puedan obtener simultáneamente -condición de simetría- no implica que pueda darse el caso de que S no posea ninguna de esas propiedades. Desde una interpretación ontológica de los estados cuánticos que no incluye el colapso, como la debida a Everett, se debe demostrar cómo pueden surgir las probabilidades de forma irreducible - esto es, para cada microestado de un sistema individual- en caso contrario, se debe admitir que la regla de Born es un postulado de la teoría cuántica.

5.3. Dificultades del programa de decoherencia y el entorno como testigo

Como se ha comentado en el capítulo cuarto, el proceso de decoherencia transforma la matriz densidad que representa al estado puro del sistema compuesto ($S+E$) en la matriz densidad reducida del subsistema que en el límite de un número inmenso de grados de libertad del entorno toma forma diagonal en la base más estable seleccionada por el entorno. El resultado así obtenido, se parece a un conjunto estadístico clásico de estados $\{|s_k\rangle\}$:

$$\hat{\rho}_{s\epsilon}(t) \xrightarrow{EM} \hat{\rho}_s^{red}(t) = \sum_k |\lambda(t)|^2 |s_k\rangle \langle s_k| \quad (5.16)$$

Ahora, si se calcula el valor esperado de las propiedades u observables ($\langle \tilde{O}_s \rangle$) mediante la operación de traza sobre la matriz de densidad reducida ($Tr[\hat{\rho}_s^{red} \tilde{O}_s]$) se obtendrá un

resultado aproximadamente igual a la media clásica y, por lo tanto, no se encontrará la contribución de las interferencias¹⁸⁴.

No obstante, por lo que hemos visto, la matriz de densidad reducida no puede representar al estado cuántico del subsistema componente (S), puesto que es fruto de la aplicación de una operación de grano grueso (proyección) sobre el estado del sistema compuesto (S+E) que desestima las componentes del entorno. El único estado que representa toda la información es el estado puro que, debido al entrelazamiento, no puede expresarse como suma de cada uno de los sistemas componentes. Esto es, necesitamos toda la información contenida en el sistema componente para tener información completa sobre el subsistema.

Como se advertía en la sección que inicia este capítulo, esta operación de grano grueso se implementa gracias a la operación de traza que supone, ya de por sí, una interpretación de la probabilidad. Esto quiere decir que se presupone la reducción del estado. Pero si tomamos por adelantado el colapso, entonces no encontramos la solución al problema de la medida ya que introducimos en los postulados de la teoría dos evoluciones temporales contradictorias una líneal y otra no líneal sin especificar cuando se aplican. Por eso, como hemos visto en las secciones precedentes, Zurek deduce la regla de Born y los saltos cuánticos de los postulados de la teoría.

Aunque este resultado autoriza a usar el modelo de decoherencia, esto no significa que se haya resuelto el problema de la medida. En efecto, durante los últimos años, se ha alcanzado un alto grado de consenso sobre la incapacidad de decoherencia para solucionarlo¹⁸⁵. En primer lugar porque no hay forma de resolver el problema de la selección del resultado final. Es decir, decoherencia consigue, en el mejor de los casos, seleccionar los estados puntero pero no decide cómo se elige de entre ellos el único estado resultado clásico. Por tanto, queda sin concluir el punto sexto del algoritmo general de la medida, puesto que no se da cuenta de los resultados experimentales ni de la experiencia ordinaria en los que siempre se obtienen valores definidos.

No obstante, muchos estudiosos piensan que sería suficiente con resolver el problema pequeño de la medida. Es decir, es suficiente explicar la apariencia clásica gracias a que los términos de las interferencias cuánticas no son accesibles [Landsman, 2017, p.441]. Pero, como hemos visto, no se puede interpretar el operador densidad reducida como ignorancia, pues representa una mezcla impropia¹⁸⁶. Por otro lado, el hecho de que los estados sensibles a la interacción con el entorno son imposibles de medir en la práctica, se podría interpretar como la evidencia incontrovertible de que las propiedades asociadas a esos estados, como la superposición, no existen [Joos et al., 2003, p.19].

Por tanto, en segundo lugar, la decoherencia como teoría dinámica de la emergencia

¹⁸⁴Siguiendo a [Schlosshauer y Fine, 2007, p.129], si las propiedades se representan por $\tilde{O}_s = \sum_{kk'} O_{kk'} |s_k\rangle \langle s_{k'}|$, entonces la operación de traza hace desaparecer los términos de interferencia cuando $k \neq k'$.

¹⁸⁵De hecho, algunos autores sostienen que lo agrava porque, extiende la cadena de Von Neumann a toda la naturaleza y, por lo tanto, la medida tiene lugar durante todo el tiempo [Landsman, 2007, p.517].

¹⁸⁶Para profundizar en esta cuestión, consultar [Suárez, 2000; 2004].

de la experiencia clásica basada en las reglas de superselección, sólo consigue justificar su existencia de forma aproximada. Estaríamos ante una definición operacional de lo que significa un estado clásico pues lo que afirma el modelo de decoherencia es que los estados del sistema y aparato juntos conseguidos tras la deslocalización de la fase son indistinguibles de las mezclas estadísticas.

En tercer lugar, todo el formalismo depende de tomar el límite para un número infinito de grados de libertad $N \rightarrow \infty$ y en tiempo también infinito. Pero si se quiebra la condición de idealización, el resultado no se puede concluir, pues no hay garantías de que la coherencia no vuelva a manifestarse. Con otras palabras, aunque las interferencias no sean observables no significa que hayan desaparecido por lo que en un futuro no es imposible que pudieran ser accesibles mediante algún método experimental. En esencia, lo que sucede es que la consecuencia física deseada - la mezcla propia- no se satisface en el caso de que el número de grados de libertad sea muy grande pero finito, sino que depende exclusivamente de la idealización a un número infinito de grados de libertad¹⁸⁷.

Ante esta tesitura, la literatura ofrece distintas estrategias para solucionar el problema: la primera sería adherirse a alguna interpretación. Una elección coherente sería acudir a la familia de interpretaciones derivadas de la del estado relativo de Hugh Everett, múltiples mundos, múltiples mentes, etc. De hecho, uno de los pioneros de la decoherencia, H.Dieter Zeh [1970] enfatizó la importancia del estudio de los sistemas cuánticos abiertos, derivada del entrelazamiento, y consideró que, al ser el universo al completo el único sistema cerrado, el camino a seguir pasaba por asignarle una función de onda universal al igual que H. Everett. Las medidas locales, dependerían de la subdivisión del universo en subsistemas y de la asignación de estados en relación al estado del universo.

Otros autores, han seguido la estrategia de estudiar cuál es la relación física correcta entre los sistemas cuánticos y los observadores. Suponen que lo importante es encontrar las correlaciones sistema-observador de tal suerte que se puedan explicar los resultados que se perciben en el mundo clásico.

Zurek nos recuerda que los observadores no interaccionan directamente con los sistemas, pues ambos se encuentran inmersos en un entorno. Para facilitar la comprensión del modelo, propone una analogía con el caso de la percepción clásica: los observadores no obtienen información sobre los sistemas directamente sino a través del entorno. En efecto, la detección de las distintas partes de los objetos macroscópicos se debe a la adquisición de información contenida en una pequeña porción de luz que ha sido dispersada por ellos. De esta forma, Zurek y colaboradores explican que es suficiente con que los ojos detecten una pequeña fracción del total de los fotones dispersados para conseguir información estable sobre los objetos. En consecuencia, el entorno se ha convertido en canal de información para descubrir el estado del sistema [Zurek, 2007b, p. 7]. Si éste es el proceso de obtención de la información bajo una perspectiva clásica, entonces se puede también considerar que la información cuántica sobre los sistemas se puede buscar en el ambiente.

¹⁸⁷Consultar las críticas de Legget en [Schlosshauer, 2011, p.155].

Como veremos en la sección dedicada a la interpretación de la mecánica cuántica con observador, Zurek y colaboradores han optado por esta opción. Buscan las soluciones estudiando cómo ha influido la interacción cuántica en el entorno. Dicho de otra manera, si en el programa de decoherencia se investigaba la influencia del entorno en el sistema, en los modelos propuestos por el Darwinismo Cuántico, lo que se pretende es lo contrario: investigar qué consecuencias ha tenido en el entorno la interacción con el sistema. Se debe explorar el rastro de la información que el sistema ha dejado en el ambiente. Ahora el entorno no sólo es el responsable de la decoherencia sino que es “testigo” de la interacción con el sistema [id.]. Los estados más robustos ante la acción del entorno son los que dejan más “copias” en él sin ser alterados. Ahora bien, como estos estados privilegiados obtenidos por decoherencia son todavía cuánticos y, por lo tanto, muestran sensibilidad a las medidas, la obtención de las propiedades objetivas¹⁸⁸ del sistema se deben adquirir sin alterar el estado.

En efecto, la diferencia esencial con la analogía clásica es que, como hemos visto, los estados cuánticos en general son “frágiles” pues cambian ante la interacción entre sistemas. De ahí que los estados más robustos, los menos interactivos, serán más accesibles sin ser perturbados en la interacción.

Desde un punto de vista puramente cuántico, la objetividad clásica se obtiene a través de la siguiente secuencia de operaciones que representan la dinámica entre sistema, entorno y observador: (1) el proceso de decoherencia “imprime copias” - correlaciones cuánticas - de los estados del sistema en el entorno. (2) Los estados que menos varían ante la acción del entorno consiguen dejar multitud de “progenie” gracias a su estabilidad. Este proceso se denomina Darwinismo Cuántico: las copias de los estados preferentes son de esta manera accesibles a los observadores de forma fulminante y la abundancia (redundancia) de la “progenie” asegura que los observadores lleguen a conocer las propiedades objetivas¹⁸⁹ del sistema mediante consenso (3) al interaccionar con el entorno. En otras palabras, los observadores miden aquellas propiedades accesibles simultáneamente sin conocer el estado del sistema de antemano y sin acuerdo previo entre ellos sobre las propiedades a medir.

Hasta ahora, el entorno podía ser considerado como monolítico, pero para que pueda constituir un verdadero canal de comunicación de las propiedades accesibles de los sistemas, se debe exigir que se puedan efectuar medidas simultáneas de propiedades que no conmuten. Es decir, de aquellas propiedades incompatibles. Por esta razón, es imprescindible que el entorno muestre cierta estructura: una división en subentornos que se combinen formando fragmentos disjuntos que posean casi la misma información - las mismas copias- sobre el sistema. Aquí reside la importancia del concepto de redundancia de la información. Ésta permite el acceso simultáneo de los observadores a fragmentos disjuntos para obtener propiedades incompatibles. Es decir, distintos observadores pueden adquirir los

¹⁸⁸Ésta es una definición operativa de objetividad que se basa en la intersubjetividad. La trataremos en el análisis filosófico del programa.

¹⁸⁹En la última sección veremos que Zurek propone una definición operacional de objetividad.

datos indirectamente del entorno mediante medidas en diferentes fragmentos disjuntos por lo que no alteran el estado del sistema a estudiar¹⁹⁰. En la (fig.5.1) se esquematizan los diferentes tipos de entorno.

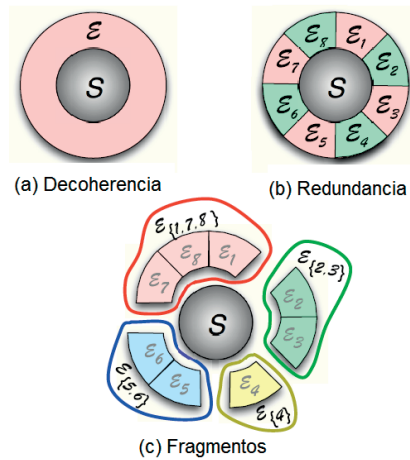


Figura 5.1: Los distintos modelos requieren de conceptos de entorno distintos desde los más simples hasta los más estructurados: a) Decoherencia: el universo se divide entre sistema y entorno, b) Redundancia: el entorno se divide en subentornos, c) Los subentornos se combinan formando fragmentos y cada uno tiene casi la información completa del sistema, a la que pueden acceder los distintos observadores (Darwinismo Cuántico). Tomado de [Zurek, 2009].

5.4. La información mutua cuántica

Por lo que se acaba de describir, en el programa de Zurek, la medida está relacionada con la transferencia de información entre el sistema, el dispositivo de medida y el entorno. El flujo de información entre estos subsistemas se sustenta gracias a que los estados puntero aseguran la unicidad y la estabilidad de la correlación.

Esta forma de entender la medida como transferencia de la información se encuentra tanto en Von Neumann [1932] como en Everett [1957].

En lo que respecta al trabajo seminal de Everett [1957], la teoría de la información de Shannon representa un instrumento no sólo matemático sino también conceptual, ya que una de las estrategias de la interpretación del estado relativo es la medida del “grado de correlación entre sistemas compuestos o entre pares de operadores en los subsistemas” [DeWitt y Graham, 1973, p. 11].

¹⁹⁰Como veremos, el hecho de que los fragmentos sean disjuntos salva el problema de que la información mutua cuántica pueda ser negativa - recordemos que en caso de entrelazamiento, la información del estado conjunto es menor que la información de cada uno de los sistemas entrelazados-. De ahí la importancia de que los fragmentos del entorno sobre los que medimos sean distintos y disjuntos. Esto garantiza que sea posible llegar a un consenso sobre un sistema único de propiedades medibles a través de medidas indirectas sobre distintos fragmentos del entorno.

Everett definió primero el concepto de información cuántica gracias a la medida de la entropía clásica de Shannon. En el caso cuántico, la distribución de probabilidad viene dada por la regla de Born. Esto le permitió establecer el concepto de información de un operador sobre el estado a través de sus autovalores. En un siguiente paso, describió la información conjunta de operadores mediante la distribución conjunta de sus autovalores. De ella, obtuvo las correlaciones del par de subsistemas. Si de ésta se sustraen las distribuciones marginales o independientes mutuamente de cada subsistema, se encuentra la información mutua que da cuenta de la transferencia. Finalmente, aplicó todo este formalismo basado en los operadores densidad al cálculo de las correlaciones antes y después de la interacción.

Zurek sigue esencialmente este planteamiento y mantiene que el concepto de transferencia de información desde un sistema S a los grados de libertad del entorno E es el proceso responsable asociado a la aparente reducción del vector de estado y, en última instancia, a la emergencia de la clasicidad [Zurek, 1990]. Por consiguiente, para entender el mecanismo de Darwinismo Cuántico es necesario el concepto de transferencia de información que se encuentra, como acabamos de apuntar, ligado íntimamente a la noción de correlación cuántica.

Así pues, es habitual que el problema de la medida se presente con la ayuda de los conceptos de entropía e información: la condición de irreversibilidad del proceso de colapso contrasta con la de reversibilidad presentada por la evolución unitaria derivada de la ecuación de Schrödinger. Este enfoque del problema se encuentra presente en los primeros años de la formulación de la teoría cuántica¹⁹¹.

En efecto, John von Neumann introdujo la entropía cuántica mediante una analogía con la entropía clásica de una mezcla de gases ideales clásicos [von Neumann, 1932, p. 256-270]¹⁹².

La idea principal consiste en extender la medida de información del caso clásico¹⁹³ al cuántico¹⁹⁴. Para conseguirlo, se sustituyen las distribuciones de probabilidad $P(x)$ por operadores densidad $\hat{\rho}$. El experimento aleatorio consta de una fuente cuántica descrita por un conjunto Ω de estados cuánticos independientes entre ellos $\Omega : \{\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2, \dots, \hat{\rho}_n\}$ con $\hat{\rho}_i = |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$. Cada uno de estos estados cuánticos tiene asociado *a priori* la probabilidad constante $P(p_i(\rho_i)) := \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. Si desconocemos la preparación del estado, la probabilidad de obtener un resultado de la medida (k) está caracterizada por la matriz densidad:

¹⁹¹La medida del orden o desorden relativo suele ser la conexión que los textos presentan entre la entropía de Shannon y las entropías que presenta la mecánica estadística. Formalmente la entropía de Shannon se asemeja a la entropía de Gibbs. Cuando todos los microestados son equiprobables y el sistema termodinámico permanece aislado, la entropía de Gibbs toma la forma de la entropía de Boltzman. Se puede relacionar la entropía de Boltzman con la de Shannon pero como veremos en la evaluación de la analogía, los conceptos son distintos: la primera se refiere al desorden en un intercambio de energía y la segunda al desorden en una secuencia de señales. Consultar apéndice B.

¹⁹²Por lo tanto, la entropía cuántica se adelantó a la de Shannon en casi dos décadas.

¹⁹³Para la estructura axiomática de la información de Shannon consultar apéndice B.

¹⁹⁴Se puede estudiar la axiomatización en [Ohya y Petz, 1993].

$$\hat{\rho} = \sum_i p_i \hat{\rho}_i \text{ con } Prob(k) = Tr(\hat{E}_k \hat{\rho}) \quad (5.17)$$

Donde se ha supuesto el caso de medida más general¹⁹⁵, que incluye el de la medida proyectiva.

Se define la *Entropía de von Neumann* para el estado cuántico $\hat{\rho}$ como:

$$S(\hat{\rho}) := -Tr(\hat{\rho} \log_2 \hat{\rho}) \in [0, \infty) \quad (5.18)$$

La entropía de von Neumann no es un observable (propiedad) sino una función de estado. Como en la mayoría de los casos no se conoce perfectamente el estado $\hat{\rho}$, este problema se traslada a la dificultad de obtener una medida de $S(\hat{\rho})$. En principio, como la matriz densidad es un operador hermítico, siempre es posible diagonalizarlo y, esto quiere decir que, para una base ortonormal $\{|a_k\rangle\}$ tenemos que $\hat{\rho}|a_k\rangle = a_k|a_k\rangle$ de tal suerte que la matriz densidad toma la forma:

$$\hat{\rho} = \sum_k a_k |a_k\rangle \langle a_k| \quad (5.19)$$

De ahí que sustituyendo en la expresión $S(\hat{\rho})$, su valor en función de los autovalores sea:

$$S(\hat{\rho}) = -\sum_k a_k \log_2 a_k \quad (5.20)$$

La entropía de Von Neumann es invariante bajo cambio de bases¹⁹⁶, pues su valor depende exclusivamente de los autovalores del estado. Además, en el caso de los estados puros, $\hat{\rho} = |a\rangle \langle a|$,

$$S(\hat{\rho}_{puro}) = 0 \quad (5.21)$$

Esta condición es consecuencia de que los autovalores de un estado puro¹⁹⁷ son todos cero salvo uno, cuyo valor es 1 por la condición de normalización de las amplitudes.

En el caso de que los estados de la colección sean puros y mutuamente ortogonales el valor de la entropía de Shannon y von Neumann coinciden. Esto quiere decir que la información de Shannon es medida de información por símbolo también cuando los estados cuánticos son perfectamente distinguibles. No obstante, generalmente los estados cuánticos no son completamente distinguibles por lo que estas dos entropías no coincidirán. De hecho, una diferencia importante entre la entropía clásica y la cuántica es la accesibilidad. Como demuestra el teorema de Holevo [1998], la máxima información que se puede obtener de

¹⁹⁵Se debe recordar que el enunciado más general de la regla de Born, que encierra el caso de la medida proyectiva o PVM, dice que la medida está asociada a un operador POVM. Consultar apéndice A.3.

¹⁹⁶En [Nielsen y Chuang, 2000, pp. 500-527] se puede encontrar el catálogo completo de las propiedades de las dos entropías.

¹⁹⁷Sea el estado puro monodimensional: $|\psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|0\rangle + |1\rangle)$ su operador densidad es $\hat{\rho} = 1/2(|0\rangle\langle 0| + |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|)$ con autovalores $\{1, 0\}$ donde $S(\hat{\rho}) = -0 \log_2 0 - 1 \log_2 1 = 0$, ya que $0 \log_2 0 = 0$.

un bit cuántico es un bit clásico¹⁹⁸. Ésta es una forma también de considerar el papel del entorno en el proceso de medida en sistemas cuánticos abiertos: las correlaciones cuánticas han quedado distribuidas en los innumerables grados de libertad del ambiente.

Una vez se ha recordado la naturaleza de la entropía cuántica, pasaremos a presentar cómo se mide la transferencia de información. Dos son las características exclusivas principales de los experimentos aleatorios cuánticos, el entrelazamiento o correlación cuántica entre sistemas multipartitos y el acceso a los resultados potenciales mediante el proceso de medida cuántico.

La entropía conjunta cuántica de un sistema cuántico bipartito cuyo estado viene representado por el operador densidad $\hat{\rho}_{AE}$ se define como:

$$S(A, E) := S(\hat{\rho}_{AE}) = -\text{Tr}(\hat{\rho}_{AE} \log_2 \hat{\rho}_{AE}) \geq 0 \quad (5.22)$$

En el caso de que el estado bipartito sea puro, como sabemos: $S(\hat{\rho}_{AE}) = 0$ y las entropías de cada subsistema son $S(A) = S(E)$.

Si el estado conjunto es separable, es decir, si no hay entrelazamiento entre los subsistemas, como hemos apuntado en el apéndice (A.2) dedicado al formalismo $\hat{\rho}_{AE} = \hat{\rho}_A \otimes \hat{\rho}_E$, donde $\hat{\rho}_A = -\text{Tr}_E(\hat{\rho}_{AE})$ y $\hat{\rho}_E = -\text{Tr}_A(\hat{\rho}_{AE})$, se cumple la aditividad de las entropías:

$$S(\hat{\rho}_{AE}) = S(\hat{\rho}_A) + S(\hat{\rho}_E) \quad (5.23)$$

Pero en el caso de que exista entrelazamiento, el estado total no es separable $\hat{\rho}_{AE} \neq \hat{\rho}_A \otimes \hat{\rho}_E$ y para estudiar cómo evoluciona la entropía lo tenemos que hacer en el marco del proceso de medida.

El comportamiento de la entropía durante el proceso de la medida depende del tipo de medida que consideremos [Nielsen y Chuang, 2000, p. 514]. En principio, si el sistema es abierto, la interacción entre dos subsistemas respeta el postulado de la evolución unitaria¹⁹⁹. Es decir, en la premedida:

$$\hat{\rho}_{AE} \rightarrow \hat{\rho}'_{AE} = U_{AE} \hat{\rho}_{AE} U_{AE}^{-1} \quad (5.24)$$

Como la unitariedad preserva la entropía²⁰⁰, la premedida no acusa cambio de entropía. O sea, la incertidumbre del estado evolucionado en la premedida no ha cambiado:

$$S(\hat{\rho}_{AE}) = S(\hat{\rho}'_{AE}) \quad (5.25)$$

Ahora bien, para obtener los resultados, debemos aplicar una medida proyectiva al estado cuántico $\{\hat{P}_i\}$, que pasará a ser mezcla. En este caso la entropía aumentará²⁰¹, salvo

¹⁹⁸Ver [Nielsen y Chuang, p. 531].

¹⁹⁹En el caso de medidas no proyectivas, la evolución no preserva la traza y esto implica que la entropía de Von Neumann puede decrecer. Consultar [Nielsen y Chuang, 2000, 515].

²⁰⁰Recordemos que la transformación unitaria conserva los productos escalares

²⁰¹La demostración se puede encontrar en [Cassiniello, 1996a, pp. 75-77] o en el libro de computación cuántica de [Nielsen y Chuang, 2000, p. 515].

que el estado antes y después de la medida no haya cambiado. Dicho en otros términos, si el conjunto de operadores que caracterizan la medida no comparten autovalores, la entropía siempre aumenta:

$$S(\hat{\rho}_{\text{después}}) \geq S(\hat{\rho}_{\text{antes}}) \quad (5.26)$$

El hecho de que la mezcla de estados siempre aumenta la entropía, fue demostrado por [von Neumann, 1932, p. 271 y ss.] apoyándose en el segundo principio de la termodinámica²⁰². Este comportamiento contrasta totalmente con el caso clásico. La medida en el caso clásico disminuye la incertidumbre. Desde el punto de vista de las distribuciones de probabilidad, restringe la información a un intervalo menor de valores, considerando los errores.

Esto no es lo que sucede generalmente en el caso cuántico. La fórmula anterior representa un aumento de la incertidumbre y, por lo tanto, una pérdida de información. Este resultado puede entender si pensamos en el caso de un estado puro completamente entrelazado. Como hemos advertido varias veces, la entropía cuántica de este estado es cero. Sin embargo, tras la medida tenemos una mezcla estadística de los estados alternativos y esto implica un aumento de entropía al final del proceso de medida.

Así mismo, la entropía cuántica también muestra la propiedad de la subaditividad y se puede expresar la relación entre la entropía del sistema conjunto y las entropías marginales como:

$$S(\hat{\rho}_{AE}) \leq S(\hat{\rho}_A) + S(\hat{\rho}_E) \quad (5.27)$$

De nuevo, esta propiedad significa que la incertidumbre del sistema bipartito conjunto es menor que la de los subsistemas componentes. O lo que es igual, el sistema conjunto aporta más información que los subsistemas.

Esta condición de subaditividad apunta la forma de medir las correlaciones cuánticas y cuantificar el entrelazamiento entre dos sistemas cuánticos. En esencia, la diferencia entre la entropía de los estados iniciales y finales sirve para definir la información mutua cuántica, que es el concepto matemático esencial para el Darwinismo Cuántico:

$$I(A : E) := S(A) + S(E) - S(A, E) \quad (5.28)$$

Donde las entropías marginales cuánticas, $S(A)$ y $S(E)$, se calculan mediante la traza parcial correspondiente sobre el estado del conjunto, promediando sobre el estado no accesible: $\hat{\rho}_A = -\text{Tr}_E(\hat{\rho}_{AE})$ y $\hat{\rho}_E = -\text{Tr}_A(\hat{\rho}_{AE})$.

El valor de la información mutua cuántica nos informa sobre “la distancia” a la que el estado conjunto se encuentra de un estado producto de dos subsistemas. Generaliza el

²⁰²Este resultado se sigue directamente de la desigualdad de Klein. Este teorema afirma que la entropía relativa nunca es negativa. El concepto de entropía negativa relaciona dos operadores densidad $\hat{\rho}$ y $\hat{\sigma}$ y se define como $S(\hat{\rho}||\hat{\sigma}) = -\text{Tr}(\hat{\rho} \log_2 \hat{\rho}) - \text{Tr}(\hat{\sigma} \log_2 \hat{\sigma})$.

concepto clásico de información mutua. Cuando el estado $\hat{\rho}_{AE}$ es separable, como es lógico, la información mutua se anula: $I(A : E) = 0$

Si recordamos lo dicho sobre la accesibilidad de la información, es preciso no olvidar que la información mutua cuántica puede sobrepasar el límite de la información mutua clásica:

$$I(A : E) \leq 2\min\{S(A), S(E)\} \quad (5.29)$$

en el caso de que el sistema bipartito sea puro, $S(A, E) = 0$. Ahora bien, los estados $\hat{\rho}_A$ y $\hat{\rho}_E$ son diagonales y comparten autovalores y, por lo tanto, las entropías de los estados de los dos subsistemas, como habíamos visto, son $H(A) = H(E)$. Utilizando esta condición y sustituyendo en la fórmula de la información mutua [Everett, 1957a, p.48]²⁰³:

$$I(A : E) = 2H(A) = 2H(E) \quad (5.30)$$

La entropía cuántica puede exceder, incluso doblar, el valor de la entropía clásica. A este fenómeno se le conoce con el nombre de supercorrelación. Este resultado es necesario para entender el proceso del Darwinismo Cuántico: el mecanismo de transferencia de información tiene el límite superior fijado por el doble de la información clásica.

En el Darwinismo Cuántico la emergencia clásica se produce cuando se ha transferido al entorno una información mutua cuántica equivalente a la información clásica del sistema bajo estudio. Es decir, en un fragmento del ambiente (E/\mathcal{F}), el observador encontrará toda la información clásica:

$$I(S : \mathcal{F}) = H(S) \quad (5.31)$$

5.5. La redundancia

Como se acaba de exponer, la información mutua cuántica es la magnitud que mide el proceso de transmisión de la información entre el sistema y el observador mediada por el entorno. Es el instrumento teórico del Darwinismo Cuántico²⁰⁴.

Supongamos que nuestro sistema S en interacción con el entorno E se representa mediante la conocida matriz de densidad:

$$\hat{\rho}_{SE} = |\Psi_{SE}\rangle\langle\Psi_{SE}| \quad (5.32)$$

La matriz de densidad se transforma en matriz de densidad reducida promediando sobre el entorno salvo el fragmento \mathcal{F} . Esto se representa mediante E/\mathcal{F} .

$$\hat{\rho}_{S\mathcal{F}} = \text{Tr}_{E/\mathcal{F}} |\Psi_{SE}\rangle\langle\Psi_{SE}| \quad (5.33)$$

²⁰³apud. [Cassiniello, 1996a, p. 79].

²⁰⁴En esta sección se seguirá ampliamente la teoría desarrollada en [Zurek, 2008] y [Zurek, 2009].

La correlación entre el fragmento y el sistema será efectivamente clásica²⁰⁵ según Zurek, mientras que el resto del entorno garantiza la decoherencia.

Con estos datos, se puede evaluar la información transferida -entropía mutua- entre el fragmento y el sistema:

$$I(S : \mathcal{F}) = S(S) + S(\mathcal{F}) - S(S, \mathcal{F}) \quad (5.35)$$

donde $S(S)$ y $S(\mathcal{F})$ son las entropías cuánticas del sistema y el fragmento y $S(S, \mathcal{F})$ su entropía conjunta. Como se ha apuntado varias veces, el límite de transferencia de información está acotado por el doble de la entropía clásica, que para todo el entorno será:

$$I(S : E) \leq 2H(S) = 2H(E) \quad (5.36)$$

Ahora bien, sólo se requiere una información aproximada a la clásica. La cuestión entonces es conocer cuántos fragmentos distintos proporcionan una información próxima a la clásica [Zurek, 2009, p.3]. Esta cantidad se computa gracias a la redundancia, \mathcal{R}_δ , que “mide el número de fragmentos que puede suplir toda la información sobre el sistema salvo una parte δ que se ha perdido”[Zurek, 2007a, p.18] o, simplemente, el número de copias en el entorno:

$$\boxed{\mathcal{R}_\delta \leq \frac{I(S : F)}{H(S)}} \quad (5.37)$$

Donde $I(S : F)$ es la información transferida por fragmento y $H(S)$ entropía del sistema.

La redundancia supone también el límite máximo de observadores que pueden encontrar el valor de las propiedades del sistema de manera indirecta e independiente.

Si \mathcal{E} representa en número de subsistemas del entorno y \mathcal{F} el número de subsistemas en un fragmento, entonces $f = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{E}}$ describe una fracción del entorno. La redundancia en función de la proporción de fragmentos δ es $\mathcal{R}_\delta = \frac{1}{f_\delta}$, que representa el número de “copias” en el ambiente. Para los fragmentos correlacionados con los punteros, $\mathcal{R}_\delta = (1 - \delta)$ con $(1 - \delta)$ el factor de proporción respecto a la información clásica tal que $0 \leq \delta < 1$ (ver figura 5.2).

En consecuencia, la información transferida al entorno accesible a la observación coincide²⁰⁶ con el “número de bits ambientales perfectamente correlacionados con la base preferente del sistema”[Zurek, 2003, p.761]:

$$I(S : F_{f_\delta}) = (1 - \delta)H(S) \quad (5.38)$$

²⁰⁵Es decir, para el estado compuesto $|\zeta\rangle = \alpha|0\rangle|\epsilon_1\rangle \dots |\epsilon_n\rangle + \beta|1\rangle|\epsilon_1\rangle \dots |\epsilon_n\rangle$,

$$\hat{\rho}_{S\mathcal{F}} = |\alpha|^2|0\rangle\langle 0|_{\mathcal{F}_\uparrow} \langle \mathcal{F}_\uparrow| + |\beta|^2|1\rangle\langle 1|_{\mathcal{F}_\downarrow} \langle \mathcal{F}_\downarrow|. \quad (5.34)$$

²⁰⁶La deducción se sigue de : $I(S : F_{f_\delta}) \geq \mathcal{R}_\delta H(S) = (1 - \delta)H(S)$.

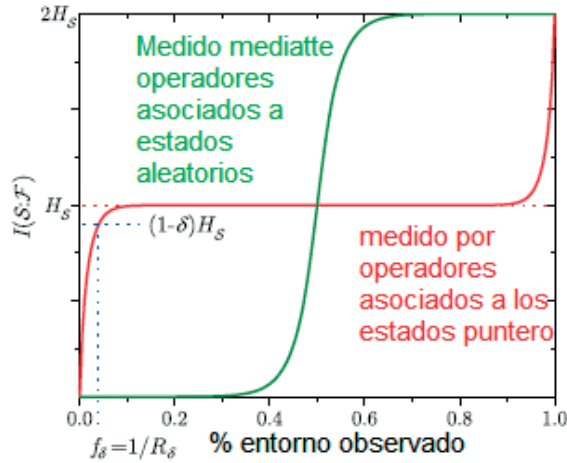


Figura 5.2: La información sobre el sistema contenida en una fracción del entorno muestra una curva en rojo que representa la información establecida mediante decoherencia. Con unos pocos fragmentos medidos, la información clásica se satura en la meseta, los fragmentos extra no aportan más información. La información completa -con las correlaciones cuánticas- se consigue midiendo casi todo el entorno. La línea verde representa la información que aporta la medida de un estado aleatorio puro en el sistema compuesto SE. Adaptado de [Zurek, 2007, p.17]

De esta manera, la redundancia²⁰⁷ “[...] permite la existencia objetiva del estado de S [que] se puede encontrar indirectamente sin que haya peligro de perturbar S con una medida.”[Zurek, 2009, p. 3].

El cambio de la redundancia [Zurek, 2003, p.762], representado por:

$$\dot{\mathcal{R}} = \frac{d}{dt} \mathcal{R} \quad (5.39)$$

es el incremento de la redundancia atribuible a una cadena de correlaciones entre entornos próximos y otros más lejanos, es “una manera de entender el flujo de información” [í.d.]. En el límite cuando la redundancia tiende a infinito es fácil obtener información del entorno y, por tanto, la experiencia clásica del mundo se obtendría gracias a la intersubjetividad de la información obtenida por distintos observadores.

²⁰⁷El ratio de redundancia se especifica para una base determinada equivale al “número de bits ambientales perfectamente correlacionados con la base preferente del sistema” y viene dado por $\mathcal{R} = \frac{\ln(\dim \mathcal{H}_\mathcal{E})}{\ln(\dim \mathcal{H}_\mathcal{S})} = \mathcal{N}$, con $\dim(\mathcal{H}_\mathcal{E})$ dimensión del espacio de Hilbert del entorno perfectamente correlacionado y $\dim(\mathcal{H}_\mathcal{S})$ la dimensión del sistema[Zurek, 2003, p.761]. La redundancia queda así especificada mediante la entropía del sistema y la información mutua \mathcal{I} que registra la correlación entre el sistema (\mathcal{S}) y el entorno \mathcal{E} , fragmentado en un conjunto $\{\epsilon^{(k)}\}$ de entornos, según la siguiente expresión: $\mathcal{I}^\mathcal{N} = \sum_i^\mathcal{N} I(\mathcal{S} : \epsilon^{(k)})$. La redundancia será: $\mathcal{R} = \frac{\mathcal{I}^\mathcal{N}}{H(S)}$.

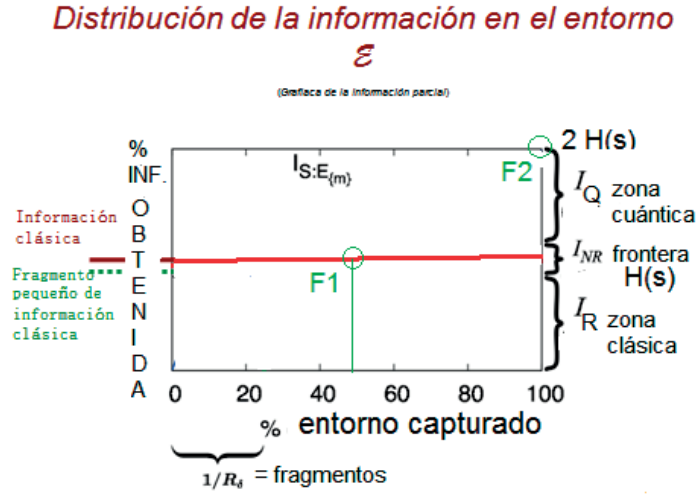


Figura 5.3: La observación del primer fragmento nos facilita toda la información clásica, representada por la meseta en rojo. La información completa, que incluye la coherencia cuántica, del sistema entrelazado se obtiene inspeccionando el segundo fragmento. Adaptado de [Zurek, 2007, p.17]

5.6. Transferencia de información y Darwinismo Cuántico

Para exponer como se produce la transferencia de información “bit a bit” Zurek [2008] presenta el ejemplo casi trivial, en el que la interacción se modeliza mediante una puerta cuántica. Tenemos el sistema S representado por un cubit normalizado $|\psi_S\rangle = (|0_S\rangle + |1_S\rangle)$ y un entorno E bicomponente, representado por $|\epsilon\rangle = |0_{\epsilon_1} 0_{\epsilon_2}\rangle$.

La interacción se representa mediante una puerta CNOT que intercabiara los bits, sólo si el bit de control es distinto de cero²⁰⁸ :

$$|\psi_S\rangle \otimes |\epsilon\rangle = (|0_S\rangle + |1_S\rangle)|0_{\epsilon_1} 0_{\epsilon_2}\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} |0_S\rangle|0_{\epsilon_1} 0_{\epsilon_2}\rangle + |1_S\rangle|1_{\epsilon_1} 1_{\epsilon_2}\rangle \quad (5.40)$$

Este estado $|\psi_{SE}\rangle$ es puro. Construimos su matriz densidad $\hat{\rho}_{SE}$ y promediamos sobre el entorno menos uno de los fragmentos, por ejemplo el $\mathcal{F} = |\epsilon_1\rangle$. Esto significa promediar sobre el dos $|\epsilon_2\rangle$. De esta forma, obtenemos la matriz densidad reducida después de

²⁰⁸ Los operadores que representan las transformaciones unitarias son las puertas lógicas cuánticas como la puerta *C-Not*, que aplicada a $|\psi\rangle$ trasforma el bit2, si el bit1 es 1, y deja el bit1 de control fijo:

$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{CNOT}|\psi\rangle = \text{CNOT}(a_1 a_2 |00\rangle + a_1 b_2 |01\rangle + b_1 a_2 |10\rangle + b_1 b_2 |11\rangle).$$

$$\text{CNOT}|\psi\rangle = a_1 a_2 |00\rangle + a_1 b_2 |01\rangle + b_1 a_2 |11\rangle + b_1 b_2 |10\rangle \in H_1 \otimes H_2.$$

decoherencia, que representa una mezcla estadística “clásica”²⁰⁹ con la correspondencia uno a uno entre el fragmento y el sistema:

$$\text{Tr}_{\epsilon/\mathcal{F}}(\hat{\rho}_{SE}) = \frac{1}{2}|0_s 0_{\epsilon_1}\rangle\langle 0_s 0_{\epsilon_1}| + \frac{1}{2}|1_s 1_{\epsilon_1}\rangle\langle 1_s 1_{\epsilon_1}| \quad (5.41)$$

Si calculamos las entropías respectivas, podemos calcular la información transferida²¹⁰, cuyo valor es $I(S : \mathbb{F}) = 1$. Esto es, sólo inspeccionando un fragmento, obtenemos toda la información clásica (ver fig.5.3). Si inspeccionamos el entorno completo, obtenemos también la información cuántica debida a las correlaciones cuánticas. Como el estado completo es puro, entonces obtenemos el doble de la información clásica $I(S : \mathcal{F}) = 2H(S)$.

Si consideramos un estado que interacciona de la misma forma que en el caso anterior, pero ahora con un entorno más complicado de tres componentes $|\epsilon\rangle = |0_{\epsilon_1} 0_{\epsilon_2} 0_{\epsilon_3}\rangle$, obtenemos el estado puro:

$$|\psi_{S,E}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_s\rangle|0_{\epsilon_1} 0_{\epsilon_2} 0_{\epsilon_3}\rangle + |1_s\rangle|1_{\epsilon_1} 1_{\epsilon_2} 1_{\epsilon_3}\rangle) \quad (5.42)$$

De nuevo tomamos la traza sobre el entorno dejando libre uno de los fragmentos. La fig.5.3 nos muestra los pasos en la transferencia de información. Al igual que en el caso anterior, con sólo observar el primer fragmento, obtenemos la información clásica accesible.

En el caso más general, el estado conjunto tendrá la forma:

$$|\psi_{S,E}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_s\rangle|0_{\epsilon_1} 0_{\epsilon_2} \dots, 0_{\epsilon_n}\rangle + |1_s\rangle|1_{\epsilon_1} 1_{\epsilon_2} \dots, 1_{\epsilon_n}\rangle) \quad (5.43)$$

para acceder a la información clásica (fig.5.4) necesitamos sólo un fragmento del entorno, hasta que alcanzamos la meseta y, sólo cuándo se ha observado todo el entorno, se recupera la información completa incluida la de las correlaciones cuánticas.

Como vemos, este caso es extremadamente idealizado porque en cada uno de los bits del entorno se consigue toda la información clásica del sistema. Es decir, la redundancia era igual al numero de subsistemas del entorno. Cada copia lleva la información clásica. Esto significa que cualquier observador que intercepte una de estas copias de información puede descubrir de forma independiente el estado “clásico” del sistema. Por eso, puede llegar a un consenso sobre el estado del sistema con otros observadores. Así, Zurek nos presenta una versión idealizada de la ramificación de estados, pues las denominadas copias no son más que los estados del sistema y entorno correlacionados uno a uno, representada por cada elemento de la suma en la ecuación ²¹¹(5.43).

²⁰⁹Recordemos que realmente la mezcla es impropia -sigue habiendo correlaciones cuánticas- aunque el observador local no pueda apreciarlas.

²¹⁰ $I(S : \mathcal{F}) = -\sum_{s=0,1} p_s \log_2 p_s - \sum_{\mathcal{F}=0,1} p_{\mathcal{F}} \log_2 p_{\mathcal{F}} + \sum_{s,\mathcal{F}} p_{s,\mathcal{F}} \log_2 p_{s,\mathcal{F}}$ las probabilidades valen $\frac{1}{2}$.

²¹¹En el caso general, con el estado inicial del sistema como $|\psi(0)\rangle = \sum_i a_i |a_i(S)\rangle$, las ramas vienen dadas por los términos de la suma:

$$|\psi_{SE}(t)\rangle = \sum_n a_n |a_i(S)\rangle \otimes |\epsilon_1\rangle \otimes |\epsilon_2\rangle \otimes \dots \otimes |\epsilon_n\rangle \quad (5.44)$$

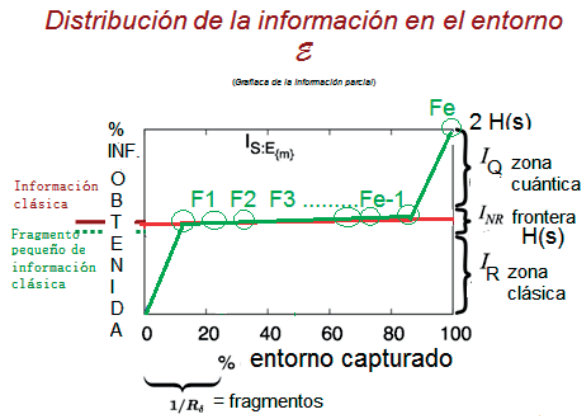


Figura 5.4: La observación del primer fragmento nos facilita toda la información clásica. La observación del segundo fragmento no aporta nada nuevo. Con la obtención del entorno completo accedemos a toda la información, incluidas las correlaciones cuánticas. Adaptado de [Zurek, 2007, p.17]

En una situación real, las copias serán imperfectas, esto quiere decir que, por ejemplo los fotones no llevarán información clásica completa del sistema. Si representamos un caso más realista fig. 5.5, basta con interceptar cinco fotones para obtener la información clásica completa sobre el sistema, lo que quiere decir que la redundancia es el número de partes del entorno completo dividido por 5, $\mathcal{R} = \frac{\epsilon}{5}$, y la fracción del entorno a la que accedemos es el inverso de la redundancia. En la figura 5.5 se aprecia que existe cierta tolerancia o error aceptable. No es necesario llegar a la meseta clásica.

Esta curva representa la información mutua transferida por los estados puntero. Es la curva de interacción de decoherencia. El operador asociado a la medida no es aleatorio, esto significa que no se toman muestras uniformes del espacio de Hilbert, sino las que coinciden con los punteros. Por eso, la interacción con el entorno selecciona un tipo particular de estados, aquellos estables ante la interacción del entorno, que proliferan de forma redundante constituyendo las ramificaciones típicas que medirán los aparatos o se correlacionarán con los estados de conciencia de los observadores.

Pero esta curva, realmente es atípica pues se genera por la información procedente de los punteros. En el caso de que se midieran fracciones del entorno - que están correlacionados con el sistema completo SE - cada vez mayores, con un operador asociado a un estado cualquiera, es decir con un operador que no está asociado a los punteros sino a un estado aleatorio, no obtendríamos casi información. Necesitaríamos medir casi la mitad del entorno para obtener la información clásica. La curva que representa esa medida aleatoria del estado se representa en la fig.5.2 en verde y la curva de medida con operadores asociados a los punteros seleccionados por decoherencia en rojo.

Como muestra la línea verde, los estados cuánticos en general no son redundantes, por eso es necesario medir la mitad del entorno para conseguir información. Un conjunto



Figura 5.5: La observación de un número suficiente de fotones aporta la información clásica deseada con un margen de tolerancia. Adaptado de [Zurek, 2008, p.20].

pequeño de estados es el que aporta la información clásica accesible para el observador, porque se encuentra correlacionada -copiada- en casi todas las fracciones del entorno.

Durante 2018, se han llevado a cabo experimentos para intentar confirmar estos resultados teóricos. Un grupo liderado por Mauro Paternostro²¹² en la Universidad de la Sapienza di Roma ha analizado los estados de los fotones procedentes de la interacción con un cristal de grafito previamente preparado en dos estados. Otro experimento con baño de fotones se ha llevado a cabo en la Universidad de Ciencia y Tecnología de China. Jian-Wei Pan²¹³ y colaboradores utilizaron un simulador cuántico de seis fotones dispersados por otro fotón que servía de blanco.

Por último, recientemente (2019), se han conocido los resultados de un tercer intento de confirmación experimental del Darwinismo Cuántico realizado por el grupo de óptica cuántica de la Universidad de Ulm (Alemania) a cargo de Fedor Jelezko²¹⁴ y en colaboración con el propio Zurek. Detectaron el comportamiento de un conjunto multipartito de espines nucleares de átomos de carbono 13 (el entorno) sobre el espín electrónico de un átomo de nitrógeno que había sido colocado en el hueco de la trama de un cristal de diamante.

Los resultados de todos estos experimentos, si bien están en la línea de lo esperado en la teoría, no son concluyentes. Encontraron una saturación de la información clásica como la expuesta en el ejemplo que hemos usado para iluminar la teoría.

No obstante, independientemente de estos resultados empíricos, desgraciadamente, como estudiaremos con detalle en la última sección de esta tesis, el proceso de Darwinismo Cuántico no soluciona el problema de la medida puesto que no aclara cómo se selecciona el resultado definido único que se muestra en la experiencia ordinaria.

²¹²[Ciampini et al., 2018].

²¹³[Chen et. al., 2018].

²¹⁴[Unden, 2019].

Capítulo 6

La interpretación existencial

Todo el programa de decoherencia como proceso dinámico con su extensión en el Darwinismo Cuántico pretende dar cuenta de la emergencia de la experiencia ordinaria desde una representación cuántica del mundo.

Como hemos visto, este programa de investigación asume lo que hemos denominado los postulados de la teoría -completud, composición de sistemas y evolución líneal-. La conexión entre el formalismo y el mundo se implementa gracias al principio de predicibilidad o repetibilidad.

La aplicación conjunta de este principio junto a la evolución unitaria postulada por el formalismo, que conserva los productos escalares, son los ingredientes con los que Zurek consigue demostrar la selección de estados que son ortogonales²¹⁵ y explica el origen de los saltos cuánticos. Es importante recordar que si los estados seleccionados no fueran ortogonales - esto es, si hubiera solapamiento- una medida posterior podría cambiar el resultado. Dicho de otra forma, aquellos estados máximamente distinguibles -los ortogonales- son los repetibles o predecibles. En conclusión, Zurek ha deducido el principio (4.1) del algoritmo de la medida, que impone el carácter hermítico de los operadores que representan a las propiedades.

No obstante, todavía quedan por demostrar los otros dos principios del algoritmo de medida: el origen de las probabilidades - o del carácter en general impredecible de los resultados- y cómo se obtienen los resultados definidos.

En cuanto al origen de las probabilidades, veámos que el mecanismo de decoherencia transformaba el estado puro, en el que estaban presentes las correlaciones cuánticas, en el estado reducido del sistema que tomaba la forma aparente de una mezcla estadística clásica. Esto podía facilitar una interpretación aditiva de las probabilidades.

Ahora bien, la decoherencia requiere de la regla de Born y, por tanto, desde este enfoque, la explicación sobre el origen de las probabilidades se torna circular. Zurek y colaboradores explican la aleatoriedad de las medidas y la aditividad de las probabilidades mediante la propiedad de invariancia asistida por entrelazamiento. La *envariancia* se fundamenta en

²¹⁵Selección inducida por el entorno -*einselection*-.

las simetrías que presentan los estados cuánticos entrelazados. Zurek encuentra en estas simetrías de entrelazamiento la razón para construir la probabilidad sobre el concepto de equiposibilidad.

En esencia, la aleatoriedad surge porque, a pesar de que el estado puro contiene toda la información del sistema compuesto, la medida accede a la información local sobre uno de los subsistemas y, consecuentemente, en el proceso se pierde aquella información contenida en las fases ahora deslocalizadas en los grados de libertad de los sistemas complementarios - e.g. entorno-. Es decir, se produce una ruptura de la simetría del estado puro en el proceso de decoherencia que se traduce en pérdida de información y aumento de incertidumbre. Éste sería el origen de la indeterminación cuántica. Zurek defiende que las simetrías aludidas son una propiedad objetiva de los estados puros y, por tanto, que el origen de la ignorancia parte de la objetividad y no de la subjetividad laplaciana.

Antes de acudir a ninguna interpretación, Zurek y colaboradores vuelven a investigar sobre el entorno buscando el rastro que ha podido quedar en él debido a la interacción con el sistema. Se ha considerado anteriormente las consecuencias sobre la interacción de los distintos subsistemas componentes y el entorno: el proceso de selección inducida por el entorno proporciona los estados que son candidatos a representar las propiedades clásicas. Gracias a su estabilidad, estos estados del puntero dejan rastro en el entorno: son promocionados a estados clásicos mediante el proceso de proliferación en el ambiente denominado Darwinismo Cuántico. De esta manera es posible acceder a las propiedades sin perturbar los sistemas. Ésta es la característica básica del comportamiento clásico para Zurek y se convierte en factible gracias al proceso de amplificación derivado del Darwinismo Cuántico.

Según Zurek y colaboradores, la experiencia ordinaria del mundo se produciría gracias a que los observadores, al medir en distintos fragmentos del entorno, encuentran con facilidad los estados puntero pues son los más robustos a las medidas, los más abundantes y, por tanto, los más accesibles.

No obstante, todavía no se ha justificado el principio (4.2) del algoritmo de la medida, que indica la existencia de un único resultado que corresponde a un autoestado del operador hermítico medido. En otros términos, queda por resolver el problema grande de la medida. Hasta este momento, el modelo que conecta el formalismo con la experiencia ordinaria - esto es, la interpretación según el esquema que hemos seguido - ha propuesto el principio de repetibilidad, la condición de simetría, la partición de los subsistemas componentes y la estructura fragmentaria del entorno pero sigue necesitado algún ingrediente más para completar el proceso de medida. Por esta razón, Zurek y colaboradores deben acudir a una interpretación en el sentido tradicional. Es necesario explicar cómo los observadores miden el entorno para dar cuenta de la existencia de una solución accesible, única y estable.

Con otras palabras, parece evidente que el observador jugará un papel fundamental en la interpretación existencial, puesto que el último estadio del proceso de Darwinismo Cuántico debe culminar con la percepción de las propiedades locales clásicas del sistema obtenidas

por los observadores del entorno, sobre las que encontrarán cierto consenso. Por tanto, Zurek y colaboradores debería explicar los dos últimos pasos del algoritmo de medida, a saber:

- 1.- ¿cómo obtienen esta información los observadores? y
- 2.- ¿cómo se explica que el observador perciba un sólo resultado?

Con otras palabras, la primera pregunta reclama respuesta sobre el tipo de relación que mantienen sistema, entorno y observador. Debe responder si considera al observador interno a la interacción, lo que implica una correlación entre sistema (S), entorno (E) y observador (O) según (S+E+O), o si el observador es externo a la interacción entre sistema y entorno. Es decir, primero se produce (S+E) y, después, el observador interviene (S+E)(O). Será por tanto importante precisar cuál es la dinámica que gobierna la interacción que selecciona uno de los términos de la base. La solución de esta cuestión está relacionada en primera instancia con el enfoque formal seguido por todo el programa de decoherencia desde el inicio tanto por Zeh como por Zurek, a saber, el formalismo del estado relativo de Everett.

Así pues, la segunda pregunta que soluciona el punto 4.2 del algoritmo de la medida, la percepción de un solo estado definido, está relacionada íntimamente con la primera puesto que depende de la manera en que se subdividan las contribuciones de los subsistemas en interacción. Esta cuestión es el centro de la crítica principal vertida por Ruth Kaestner [2014] al programa de darwinismo cuántico: la elección de la partición del sistema componente en subsistemas es convencional, lo que podría introducir elementos clásicos inicialmente en el argumento de Zurek y convertirlo en circular²¹⁶. La consecuencia principal del argumento de Kaestner es importante: si se introducen en las premisas las características clásicas - como el no entrelazamiento inicial entre sistema, aparato y observador o la separabilidad de los observadores y de sus entornos asociados-, entonces del Darwinismo Cuántico no se derivan los fenómenos observados en la experiencia ordinaria, pues de hecho se encontraban ya incluidos. Es decir, como veremos, al igual que en la interpretación de Bohr, el mundo clásico se da por supuesto. Por esta razón, desde el punto de vista interpretativo, seguiría sin poderse derivar “el mundo clásico” del “cuántico”. Dicho de otra manera, mediante la transferencia de la información desde el ámbito cuántico sigue siendo necesario introducir alguna componente clásica para obtener el mundo de nuestra experiencia ordinaria.

Ésta es una de las claves para entender el problema al que se enfrentaron los partidarios de la interpretación de Copenhague²¹⁷ y los actuales seguidores de la interpretación de los múltiples universos. Veremos que entre las versiones más extremas de estos dos enfoques, el programa del Darwinismo Cuántico y la interpretación existencial desea evitar la Escala del instrumentalismo y, a la vez, pretende no toparse con los problemas ontológicos de la Carbida del realismo.

²¹⁶Kaestner lo compara con la circularidad del argumento de irreversibilidad derivado del teorema de Boltzmann pues el físico vienés lo introdujo al suponer el caos molecular.

²¹⁷No entraremos a detallar cuál sea esta interpretación pues sólo nos interesa la posición de Bohr.

6.1. Entre las interpretaciones de Niels Bohr y Hugh Everett

“La decoherencia explica cómo el reino clásico puede surgir dentro del universo cuántico, algo que parecía tan desconcertante hace tres décadas. Por lo tanto, la decoherencia constituye un progreso muy significativo (aunque no es una interpretación per se). Puede encajar tanto en el punto de vista de Bohr como en el de Everett. Tal vez sea incluso un puente entre ellos. Una consecuencia natural de la decoherencia es la superselección inducida por el entorno, o ‘*einselection*’ para abreviar. Define qué estados persisten a pesar de la decoherencia. Los llamados estados de puntero, que pueden sobrevivir intactos a la decoherencia, son entonces los candidatos obvios para los estados clásicos.

Esto sugiere una “interpretación existencial” que construye un puente entre el frágil mundo cuántico y el mundo clásico más robusto de nuestra experiencia cotidiana. Pero estos resultados se derivan directamente de la teoría cuántica y pueden encajar dentro del punto de vista de Bohr (donde delínean el borde cuántico-clásico) o los estados relativos de Everett (que restringen la ‘relatividad’ y ayudan a definir las ramas del vector de estado universal).” [Zurek, 2011, p. 85].

Esta cita fija claramente el lugar que Zurek asigna a la interpretación existencial. Para dar cuenta de la experiencia de un mundo clásico, propone una solución intermedia que relacione las interpretaciones de Niels Bohr y Hugh Everett, sin comprometerse con la excesiva multiplicidad ontológica de la segunda [2007, p.25].

En efecto, el primer trabajo que Zurek desarrolló sobre los fundamentos de la mecánica cuántica corresponde a su época de estudiante de doctorado en Austin Texas donde preparó un seminario sobre el célebre debate Bohr-Einstein relacionado con el experimento de la doble rendija²¹⁸.

Fruto de aquellas investigaciones, W.H.Zurek y W.K.Wootters publicaron un artículo en 1979 donde se estudiaba el tipo de patrón de interferencias producido cuando se intenta averiguar por cuál de las dos rendijas pasa el fotón.

En contraste con el planteamiento de Bohr, para quién el dispositivo de medida se debe tratar, al menos parcialmente, como clásico bajo las limitaciones de las relaciones de indeterminación, para W.H.Zurek y W.K.Wootters, el experimento de la doble rendija se puede ampliar considerando como cuánticos tanto la doble rendija - cuyo modelo era un oscilador armónico- como el fotón. Es decir, utilizaron el fenómeno de los pares entrelazados (EPR) para describir la interacción entre fotones y rendijas de tal forma que se convertían en dos subsistemas no separables de un sólo sistema cuántico [Wootters y Zurek, 1979, p.19].

Finalmente, el artículo discutía el principio de complementariedad en términos de la información de Shannon:

²¹⁸Agradezco a Nahuel Sznajderhaus que me facilitara el paper de [Camilleri, 2009] que guía nuestro comentario histórico.

"La agudeza del patrón de interferencia se puede considerar como una medida de cuánto se parece la luz a una onda, y la cantidad de información que hemos obtenido sobre las trayectorias de los fotones se puede considerar como medida de su similaridad con las partículas."[ib., p.81].

En definitiva, el artículo pretendía reformular el principio de complementariedad desde una perspectiva totalmente cuántica, evitando la utilización de los términos clásicos a costa de transferir su función a un concepto de información que como veremos es, cuando menos, controvertido.

Éste fue el punto de partida de un programa de investigación dedicado a explorar la frontera entre las dos descripciones. Al parecer de algunos de sus protagonistas de decoherencia como Zurek [2002] y Roland Omnès [1994, p, 498], esta puede conducir a una versión renovada de la interpretación de Copenhague. Aunque, como hemos ya advertido, la decoherencia física es independiente de la interpretación.

6.1.1. La interpretación del estado relativo

Como es bien conocido²¹⁹, a pesar de que la decoherencia física es independiente de la interpretación, como afirma Schlosshauer: "los partidarios de la decoherencia se han inclinado típicamente hacia interpretaciones de estado relativo (por ejemplo, Zeh, 1970, 1973, 1993; Zurek, 1998)" [2005, p. 22]. La razón se puede encontrar en que la interpretación del estado relativo comparte el planteamiento estructural de la teoría que los promotores de la decoherencia: partir del formalismo cuántico - los postulados de completud, linealidad y composición de sistemas - y ciertas presuposiciones, como las anteriormente enunciadas, para explicar la emergencia de las propiedades clásicas. Por otro lado, parece obvio "identificar los componentes decoherentes de la función de onda con las diferentes ramas de Everett." [íd.].

En efecto, Zurek y colaboradores sostienen que los subsistemas del universo (sistemas, aparato, entorno y observador) son todos cuánticos. La complejidad del entorno cuántico, y no su naturaleza clásica, es la que determina la capacidad de decoherencia y la posibilidad de que el proceso de Darwinismo Cuántico pueda objetivar los resultados. Por esta razón, en principio no hay lugar para observadores externos.

En consecuencia, parece comprensible que estos autores tomen el modelo matemático del formalismo de Everett para solucionar el problema de la transición cuántico-clásico²²⁰. Como era de esperar, asumir este planteamiento podría conllevar el afrontar problemas parecidos, algunos fruto de sus compromisos filosóficos²²¹ como: la interpretación de

²¹⁹Ver por ejemplo Schlosshauer [2007, cap. 8 y 9] y Bacciagaluppi [2012].

²²⁰Para profundizar en el tema desde el punto de vista de la información consultar [Cassiniello, 1996].

²²¹En este punto, es importante aclarar que la interpretación del estado relativo fue propuesta originariamente por Hugh Everett [1957a]. No obstante, existen distintas versiones que otros autores, hasta el presente, han considerado como herederas de este programa al que se suele denominar "interpretaciones de los múltiples universos o de los múltiples mundos". Ciertamente, las distintas versiones de este programa coinciden en asumir

la probabilidad -derivación de la regla de Born y justificación del significado de las probabilidades-, origen de la estructura de ramificación -problema ontológico o de ambigüedad de la base- y exuberancia ontológica -h.e. explicar la existencia de una sólo experiencia “clásica”.

Como se acaba de decir, la idea fundamental de Everett²²³ consiste en conseguir una interpretación directa del formalismo, empíricamente adecuada y lo más parsimoniosa posible. Las hipótesis en las que se basa su programa son las siguientes:

1. Todo lo que hay es la función de onda que representa el estado físico del universo en su totalidad.
2. La dinámica líneal sigue la ecuación de Schrödinger.
3. Mantiene la asociación autovalor-autovector.
4. Descarta el postulado de colapso, por lo que todos los términos de la expansión de dicha función de onda se realizan.
5. Los observadores forman parte del universo.
6. Sus estados físicos, así como los de cualquier subsistema, son relativos al resto del universo y, por lo tanto, al resto de los observadores.

En efecto, la revolucionaria propuesta de Everett:(1) abandona el proceso irreversible o colapso y (2) postula una función de onda universal que obedece una dinámica exclusivamente determinista y líneal en la que se encuentra incorporado el observador (3) como un sistema físico más dentro del universo. La experiencia del observador, fruto de las correlaciones internas con el resto del universo, acude al cálculo de probabilidades - obtenido mediante la regla de Born derivada del formalismo²²⁴ - para poder predecir eventos futuros [Everett, 1957b, p.117-118].

Para Everett, el universo es un gran sistema cuántico cerrado. El estado del observador, como el de cualquier subsistema cuántico, es relativo respecto al estado del universo.

Efectivamente, tomemos un ejemplo sencillo para iluminar su propuesta: el estado físico de un sistema cuántico multicomponente se encuentra en superposición $|\psi_0\rangle = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle$. La correlación entre sistema bajo estudio, aparato $|a_p\rangle$ y el observador $|O_p\rangle$, convierten al último, siguiendo el principio de línealidad, en un observador propio del sistema cuántico:

$$|\psi_0\rangle \otimes |a_p\rangle \otimes |O_p\rangle \rightarrow$$

el formalismo de Everett²²² pero se diferencian en cuestiones importantes.

²²³La presentación de este apartado debe mucho a la paciente orientación y explicaciones que recibí de Jeffrey Barrett durante mi estancia en la Escuela de Filosofía de la Física celebrada en Sieg durante el Verano de 2014. Parte del material se puede encontrar en [Barrett, 1999; 2012; 2014].

²²⁴Cosa que no consiguió Everett ni sus seguidores - ver [Casiniello, 1996]-, hasta que D.Wallace y W.H. Zurek presentaron sus respectivas propuestas- consultar [Saunders et al., 2010].

$$|\psi_t\rangle = \alpha|\uparrow\rangle \otimes |a_p \uparrow\rangle \otimes |O \uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle \otimes |a_p \downarrow\rangle \otimes |O \downarrow\rangle$$

donde α y β son las amplitudes complejas y cumplen la condición de normalización $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

Como explicamos en el problema de la medida, el observador no puede adjudicar un valor definido a este estado cuántico en superposición. De hecho, si consideramos observadores sucesivos, se produce un “anidamiento” de observadores,

$$\begin{aligned} |\psi_0\rangle \otimes |a_p\rangle \otimes |O_{1p}\rangle \dots |O_{np}\rangle \rightarrow \\ |\psi_t\rangle = \alpha|\uparrow\rangle \otimes |a_p \uparrow\rangle \otimes |O_1 \uparrow\rangle \otimes \dots |O_n \uparrow\rangle + \\ \beta|\downarrow\rangle \otimes |a_p \downarrow\rangle \otimes |O_1 \downarrow\rangle \otimes \dots |O_n \downarrow\rangle \end{aligned}$$

Este comportamiento derivado de los postulados de la teoría posteriormente se llegó a llamar la paradoja del “amigo de Wigner” [1963]: cada observador queda correlacionado en un estado global al que no se puede asignar un valor bien definido.

Para resolver el problema del anidamiento, Everett diferenciará dos tipos de estado: el absoluto ($|\Psi\rangle$) y el relativo ($|\psi\rangle$). En última instancia, el estado absoluto vendría representado por la función de onda del universo “ Ψ_{universo} ” que representaría al universo como un sistema cerrado. Es ahora comprensible que bajo esta interpretación no pueda existir observador exterior o medida externa bajo la que se produzca el colapso.

Los estados definidos se obtienen a través de lo que Everett denomina “secciones cruzadas (*cross sections*) de la función de onda total” que permitirán calcular la probabilidad en cada sección según: $Prob(k) = |\langle\Psi|\psi_i\rangle|^2$. En consecuencia, los estados definidos para un observador están correlacionados con los estados de los demás observadores y con el resto del universo.

Esto quiere decir que, en el caso de dos observadores y prescindiendo de la descripción del resto del universo, la estructura del estado nos da para cada rama el siguiente resultado:

Para la rama: $|\uparrow\rangle \otimes |a_p \uparrow\rangle \otimes |O_1 \uparrow\rangle \otimes |O_2 \uparrow\rangle$, el estado con respecto al observador 2 tienen como resultado $|O_2 \uparrow\rangle$, es relativo al observador 1 cuando está en el estado arriba $|O_1 \uparrow\rangle$, cuya amplitud será α y la probabilidad asignada corresponderá a $|\alpha|^2$.

En el caso de la segunda rama: $|\downarrow\rangle \otimes |a_p \downarrow\rangle \otimes |O_1 \downarrow\rangle \otimes |O_2 \downarrow\rangle$, la medida con respecto al observador 2 tiene como resultado $|O_2 \downarrow\rangle$, relativo al observador 1 cuando está en el estado abajo $|O_1 \downarrow\rangle$, cuya amplitud será β con probabilidad asignada $|\beta|^2$.

Así, a pesar de que el formalismo es completamente determinista, debido a que la dinámica respeta la ecuación de Schrödinger, la experiencia subjetiva de cada observador está relacionada con la de otros observadores y, por lo tanto, la probabilidad es fruto de la ignorancia sobre la rama en la que se encontrará. En palabras de Everett:

“... deduciremos las afirmaciones probabilísticas como apariencias subjetivas para tales observadores, poniendo así la teoría en correspondencia con la experiencia. Llevándonos a la situación novedosa en la que la teoría formal es objetivamente continua y probabilística.”[Everett, 1957b, p. 76].

El problema es justamente explicar cómo se asignan las probabilidades si se dan de hecho todas las ramas y cómo se produce esa experiencia subjetiva. Para responder a la segunda pregunta, Everett sugirió que sería suficiente suponer las memorias de los observadores de naturaleza relativamente permanente cuyos estados corresponderían a la experiencia pasada del observador. La experiencia subjetiva se obtendría de tomar los contenidos de esa memoria²²⁵. En consecuencia, el observador sería análogo a una máquina automática que acumula secuencias de observación (medidas) y que toma sus decisiones apoyada en el historial de sus resultados [Everett, 1957b, p.64].

No obstante, B. S. DeWitt argumentó en una carta a John Wheeler, que la teoría así formulada no era empíricamente adecuada, puesto que “las trayectorias de la configuración de la memoria de un observador real [...] no se ramifican”²²⁶ cosa que podía certificar gracias a su introspección personal. Realmente, el problema consistía en que la función de onda universal, que contenía todas las posibles historias o bifurcaciones al mismo tiempo, no correspondía con la única rama del mundo real que experimentamos [Barrett y Burne, 2012, p. 247]. Es decir, para DeWitt, no hay medida si no existen subsistemas [Everett, 1957b, p.160]. Por lo tanto, era necesario agregar el postulado de complejidad (composición de sistemas).

Bryce S. DeWitt y Neil Graham [1973, p. v] se darían cuenta de que la consecuencia observacional de esta dinámica parecía conducir inexorablemente a la multiplicidad de los estados macroscópicos, lo que significaba una proliferación de mundos en continua división. En efecto, para la interpretación de múltiples mundos, cada una de los resultados serían consecuencia de un proceso de ramificación en el que el estado físico del observador sería relativo a una rama particular²²⁷.

Ante la opinión de DeWitt sobre la no adecuación empírica de la interpretación de los estados relativos y su propuesta de multiplicidad, Everett contestó²²⁸, inspirado por el empirismo lógico, que la bondad de una teoría se encontraba en la consistencia lógica y su corrección. Consideraba que las teorías eran modelos: constructos susceptibles de manipulación, de tal suerte que sólo algunos de ellos están asociados con la percepción. En última instancia, la relación entre los modelos y el mundo que experimentamos era un homomorfismo, o sea, en cada modelo, cada experiencia estaba asociada a un observador relativa a los demás y nuestra experiencia no era más que una secuencia de grabaciones en la memoria en un modelo [Barrett y Burne, 2012, p. 253].

El homomorfismo citado se extiende desde la mecánica ondulatoria pura (MOP) a través de los modelos tipo (MT) a la experiencia del mundo:

²²⁵Más concretamente, se encontraría en las configuraciones relativas de la memoria de los observadores en una “sección transversal” particular del estado completo.

²²⁶[Barrett y Burne, 2012, p. 246].

²²⁷La interpretación de las múltiples mentes considera el estado relativo a un estado de conciencia particular del observador perteneciente a un conjunto que representaría la mente. Ver por ejemplo [Lockwood, 1996].

²²⁸Para repasar este tema se acudirá ampliamente a la correspondencia incluida en [Barrett y Burne, 2012].

$$MOP \rightarrow MT \left\{ \begin{array}{c} (\dots) \\ (\{a_{56}| \uparrow\rangle| \uparrow\rangle| \downarrow\rangle\dots\}) \\ (\{a_{55}| \uparrow\rangle| \downarrow\rangle| \downarrow\rangle\dots\}) \\ (\{a_{54}| \uparrow\rangle| \downarrow\rangle| \downarrow\rangle\dots\}) \\ (\dots) \end{array} \right\} \rightarrow Experiencia\{a_6| \uparrow\rangle| \uparrow\rangle| \uparrow\rangle\dots\}$$

Para múltiples observadores en interacción con el sistema y el aparato de medida, todos estarán correlacionados debido a la linealidad de la evolución cuántica y, en principio, llegarán a un acuerdo intersubjetivo sobre el resultado.

Everett también indicó a DeWitt que sería muy improbable detectar la estructura excedente de las ramas adicionales²²⁹ aunque no imposible ya que, no se debía pensar en esa estructura como excedente pues “es inadecuado atribuir cualquier validez o ‘realidad’ menor a un elemento de una superposición que a cualquier otro elemento, debido a [la] posibilidad, siempre presente, de obtener efectos de interferencia entre los elementos; todos los elementos de una superposición deben considerarse simultáneamente existentes.” [apud. id.]²³⁰. Veremos como Zurek y colaboradores siguen fielmente estos planteamientos de Everett.

6.1.2. La interpretación de Bohr interpretada

Según Byrne [2012, p.526], al proponer su interpretación, Everett deseaba tender un puente entre las posiciones de Einstein y Bohr: por un lado, la interpretación del estado relativo era determinista y, a la vez, se mostraba el carácter aleatorio en el sentido fuerte en un contexto subjetivo, pues cualquier predicción se vería limitada por la relaciones de indeterminación.

A tenor de lo que indican las fuentes, parece que el grupo de Copenhague no consideró adecuado este intento de conciliación. La objeción principal de Bohr²³¹ al trabajo de Everett estaba relacionada con el uso de los conceptos clásicos.

En primer lugar, para Petersen y Bohr pensaban que, en la interpretación del estado relativo, no se producía la medida puesto que la idea de observación, simplemente, pertenecía al mundo clásico. En segundo lugar, según Petersen, “las matemáticas no se pueden usar en física hasta que tenemos las palabras. No somos servomecanismos. Lo que entendemos por física es lo que se puede expresar de forma inambigua en lenguaje ordinario” [apud., ib., 527].

Por último, al grupo de Copenhague le parecía más efectivo y promisorio el marco de la

²²⁹Debido a que la linealidad de la evolución hace que los registros sean repetibles y la superposición de estados macroscópicos es muy improbable.

²³⁰Barrett [2012] considera que esta última afirmación lo que en esencia sostiene es que “las ramas alternativas son reales no como mundos causalmente separados sino como características potencialmente detectables de nuestro mundo”.

²³¹Comunicada a través de Aege Petersen el 24 de abril de 1957 [Byrne, op.cit., 527].

complementariedad y la correspondencia, teniendo en cuenta que en los macrosistemas se pueden prescindir de los efectos cuánticos justo en el momento de la medición [ib., 531].

La opinión de Everett sobre la interpretación de Copenhague era clara, no hay justificación para eliminar los citados efectos cuánticos en los aparatos de medida y menos para “una explicación consistente del proceso irreversible de medida” [Everett, apud., ib., 526] que ni siquiera se da en física clásica. Everett pensaba que ambas cuestiones son dogmáticas y podrían considerarse postuladas *ad hoc*. En carta a Bryce DeWitt se expresa así de contundente:

“ [la Interpretación de Copenhague] es irremediablemente incompleta debido a su confianza previa en la física clásica (excluyendo en principio cualquier deducción de la física clásica de la teoría cuántica, o cualquier investigación adecuada del proceso de medición), así como una monstruosidad filosófica con un concepto de “realidad” para el mundo macroscópico y, a la vez, la negación de lo mismo para el microcosmos” [Everett, apud. id.].

Tras la exposición de la opinión desfavorable del grupo de Copenhague sobre la interpretación del estado relativo, surge la pregunta de hasta qué punto el programa general del Darwinismo Cuántico y la interpretación existencial pueden acomodarse a estas dos interpretaciones.

Para satisfacer este objetivo, es necesario investigar lo que Zurek entiende por el “punto de vista de Bohr” y poder enmarcarlo dentro del debate sobre la filosofía del físico danés. Desde luego, no es posible desplegar aquí una exposición exhaustiva, pues quedaría fuera de los objetivos de la tesis. Nos conformamos con poder caracterizar de forma sintética los principales enfoques.

El debate sobre la interpretación que Bohr sostenía de la mecánica cuántica está lejos de alcanzar el consenso. Transita “[...]desde inclinaciones kantianas hasta posturas descaradamente naturalistas.” [Rioja, 2019, p.430], a saber: desde aquellos que opinan que Bohr propone un nuevo tipo de realismo basado en el uso analógico de los conceptos clásicos para explicar la imagen cotidiana del mundo, pasando por aquéllos que consideran la filosofía de la complementariedad como ejemplo de fenomenismo al atribuir a la teoría cuántica un mero valor instrumental [Cadenas, 2004, p.222 y ss.]. Esta corriente presenta también versiones pragmatistas, incluso en traducciones naturalizadas: los conceptos clásicos serían resultado de la adaptación al medio derivado de un proceso darwinista²³².

El significado de la doctrina de la complementariedad se suele presentar mediante la doble variante del famoso experimento de interferencias de la doble rendija²³³.

Supongamos un banco experimental compuesto secuencialmente de una fuente de partículas, una pantalla con doble rendija y otra donde se registran los impactos. Si la fuente

²³²Para un resumen del estado de la cuestión, consultar [Rioja, 2019], [Faye y Folse, 2017], [Zinkernagel, 2016] y [Faye, 2014].

²³³Seguimos aquí la clásica presentación de [Feynman et al., 1963, vol III, cap.1].

de partículas es clásica y lanzamos un haz de partículas sobre una doble rendija, se observan impactos sobre la pantalla de medida que tienen máxima probabilidad de llegada en la línea trazada desde las rendijas (fig.6.1 C).

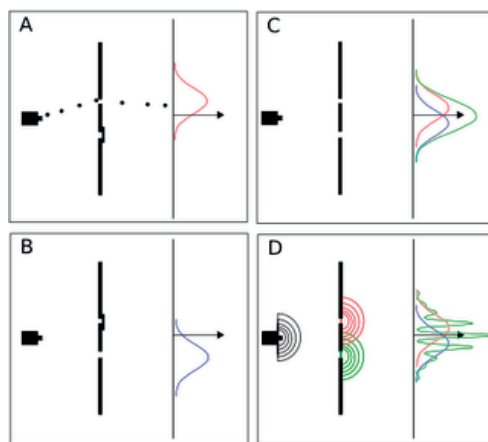


Figura 6.1: Experimentos de la doble rendija.

Por otro lado, si la fuente emitiera ondas, como están deslocalizadas, al pasar por la doble rendija los dos frentes de onda interferirán formando su intensidad sobre la pantalla una figura o patrón de interferencias (fig.6.1 D). Si hacemos el mismo experimento con electrones preparados idénticamente, encontramos impactos en la pantalla de medida. Si abrimos sólo una de las rendijas, la distribución de los impactos coincide con el modelo clásico (fig.6.1 A ó B). Ahora bien, al realizar el experimento con las dos rendijas abiertas, esperaríamos que el patrón de impactos de los electrones fuera como el de partículas clásicas (fig.6.1 C), dos distribuciones de impactos en la línea de las rendijas. El resultado del experimento no acontece como esperábamos: nos vemos sorprendidos por la aparición de un patrón de interferencias de tipo ondulatorio (fig.6.1 D). Para descartar cualquier interacción entre los electrones enviados, repetimos el experimento disparando electrón a electrón de forma que pasen uno a uno por el montaje de la doble rendija antes de impactar en la pantalla. Al pasar el tiempo, comprobamos que, a pesar de que la emisión de electrones es individual, se ha formado una figura de interferencias (fig.6.1 D).

La pregunta teórica consecuente con este resultado es la siguiente: ¿cómo podemos calcular la distribución de impactos en la pantalla? En el caso de que los electrones pasaran por una de las dos rendijas A ó B, la probabilidad de que atravesase la rendija A e impacte en un punto x de la pantalla será $P_A(x)$ y en el caso de que pase por B será $P_B(x)$. Es decir, la probabilidad de que llegue a x , por el camino que pasa por A o por B es $P_{AUB}(x) = P_A(x) + P_B(x)$. Pero como vemos en la figura (fig.6.1 D), la probabilidad de que impacte en x no es la suma de las probabilidades de pasar por dos caminos de forma independiente. Por lo tanto, el experimento con electrones nos muestra claramente que el cálculo de la probabilidad no es el de los sucesos independientes: $P_{AUB}(x) \neq P_A(x) + P_B(x)$.

Hemos visto que el resultado del experimento muestra una figura de interferencias en

el montaje de doble rendija. Bohr plantea una variante a este esquema experimental²³⁴: averiguar el camino seguido por los electrones colocando un resorte móvil que se desplaza verticalmente al paso de las partículas. En la segunda variante, independientemente de como sea el flujo de electrones, desaparece la figura de interferencias. La interpretación de este resultado indica que no es posible determinar con máxima precisión simultáneamente en un único experimento la posición de los electrones y los momentos asociados, que indican la dirección tomada hacia la pantalla. La interacción incontrolable entre el sistema cuántico y el dispositivo de medida se encuentra a la escala del cuanto de acción de Planck y la dispersión simultánea de las medidas de posición y momento queda acotada por las famosas relaciones de incertidumbre. En consecuencia, Bohr afirma

“la imposibilidad, en el análisis cuántico de los efectos, de establecer cualquier separación aguda entre un comportamiento independiente de los objetos atómicos y su interacción con los instrumentos de medición que sirven para definir las condiciones bajo las cuales se producen fenómenos” [apud. ib., 11].

Siguiendo a Zinkernagel [2016, p.11], el problema reside en que no parece posible un análisis causal y espaciotemporal simultáneo del propio proceso de medida. Para Bohr, el sistema-dispositivo al completo es inseparable antes de obtener los resultados. Esta indivisibilidad puede interpretarse en términos siguientes: (1) la función de onda sólo se asocia a los objetos en un cierto marco experimental, (2) la dinámica de obtención de los resultados no puede analizarse debido a la incontrolable interacción y, por tanto, no se puede desplegar una descripción causal y espaciotemporal [íd.]. Para poder concluir la medición, se plantea la necesidad de marcar una línea divisoria entre el sistema y el dispositivo de medida. Este corte no tiene porqué ser físico pero sí, cuando menos, de orden lógico. Con otras palabras, no sería necesario admitir un colapso en sentido físico, bastaría con que éste fuera simplemente una “noción formal” consistente en el reemplazo de la superposición por alguna de las componentes. Pero, a la vez, se mantiene el uso de los conceptos clásicos con ciertas cautelas pues es en el régimen clásico donde se obtienen los resultados.

Creemos que la filosofía de Bohr se debe presentar desde el contexto experimental en el que el cuanto de acción pertenece al ámbito de lo empírico y no al filosófico. Es en este sentido en el que el físico danés afirma que los experimentos requieren de descripciones que están basadas en las categorías comunes, que pueden conducir a cierta objetividad en la descripción de la naturaleza. Por eso,

“Es decisivo reconocer que, *por mucho que los fenómenos trasciendan el alcance de la explicación de la física clásica, el relato de todas las pruebas, debe expresarse en términos clásicos.* El argumento es simplemente que con la palabra «experimento» nos referimos a una situación en la que podemos decirle a otros qué hemos hecho y lo que hemos aprendido y que, por lo tanto, la gran cantidad

²³⁴Consultar [Wheeler y Zurek, 1983, pp. 27 y ss.].

de arreglos experimentales y los resultados de las observaciones tienen que ser expresados en un lenguaje carente de ambigüedad con la terminología adecuada de la física clásica” [1949, 39].

El argumento se desplegaría de la forma siguiente: como los conceptos clásicos son necesarios para orientarnos en la fase experimental y poder comunicar los resultados, su papel parece que es fijar estas categorías. No obstante, estos conceptos no son aplicables al micromundo ya que, debido a la introducción del cuanto de acción de Planck, no es posible asignar propiedades a los microobjetos sin tomar en cuenta el marco experimental. Por este motivo, los conceptos clásicos sólo son aplicables a los fenómenos fruto de la medida y no directamente a los sistemas.

En este punto es donde algunos autores sostienen que se produce el necesario viraje hacia un nuevo tipo de objetividad²³⁵. Siguiendo ampliamente la exposición de [Cadenas, 2004, cap. 4], en el caso de la física clásica, la relación entre el formalismo y el mundo se establece a través de un isomorfismo entre concepto y objeto gracias a que ambos comparten la estructura espaciotemporal, que es el marco donde las medidas asignan las propiedades a los objetos. Esto implica que una concepción de la objetividad clásico encuentra anclaje en una ontología de entidades externas cuyas propiedades refieren a dichas entidades y son, por lo tanto, independientes del observador.

En la teoría cuántica, el cuanto de acción impone la discontinuidad de la descripción espacio temporal y un nuevo concepto de observación en el que se da una relación indisoluble entre instrumento y dispositivo de medida. En estas circunstancias, la observación se obtiene no sobre el objeto independiente del observador sino sobre el fenómeno, que incluye tanto a los sistemas bajo estudio como a los instrumentos de medida [ib., 214]. La consecuencia fundamental es que ya no se puede mantener el concepto de objetividad clásico: si se parte de la descripción de los fenómenos y no de los objetos, el concepto de objetividad se debe apoyar en el acuerdo intersubjetivo proporcionado por un lenguaje inambiguo. De esta manera se sortea la fuente de ambigüedad originada por la imposible distinción entre sistema y dispositivo de medida.

En el nuevo escenario cuántico, tampoco el significado de los conceptos clásicos puede descansar en los objetos independientes del observador sino en los fenómenos. Este cambio de referente donador de significado extralingüístico, implica un cambio en el uso de los conceptos clásicos limitado por los postulados cuánticos. Por esta razón, la conexión entre el formalismo y la experiencia del mundo ya no se establece de forma directa, sino mediante el uso análogo de los conceptos clásicos, que les dota de significado preciso en el nuevo marco teórico [ib., 226-228].

De lo anterior se infiere que, según este planteamiento, no sea posible mantener el realismo de la física clásica en el que las propiedades pertenecen a los sistemas físicos. En

²³⁵ Esta nueva objetividad tiene ciertos aires de familia con el kantismo o el neokantismo, c.f. [Rioja, 1992, 278-282; 1995] y [Faye, 2014, p.19].

el nuevo marco, éstas deben asignarse a los fenómenos. El uso análogo de los conceptos clásicos permite acercarse a una realidad clásica idealizada de manera asintótica cuando los números cuánticos son elevados. Dicho de otra forma, el límite marcado por el principio de correspondencia, entre la descripción clásica y la cuántica, establece la forma en que se puede recuperar la descripción causal y el continuo espaciotemporal [ib., 256].

Bajo esta perspectiva, se podría extender este análisis al ámbito actual de la decoherencia física, que recordemos sólo implica una ampliación del área en la que opera el formalismo cuántico. En efecto, el límite entre lo cuántico y lo clásico se podría estudiar en el marco de los fenómenos, ya que la observación incluye tanto a los sistemas como a los dispositivos de medida, y no necesariamente se refiere a la separación entre el micro y el macrocosmos, pues el aparato puede describirse mediante la mecánica cuántica.

Ahora bien, se deben hacer varias observaciones. En primer lugar, para Bohr y en el marco de la complementariedad - es decir, en el de una interpretación del formalismo cuántico-, los conceptos clásicos son independientes y anteriores a cualquier descripción basada en la teoría cuántica [Bacciagaluppi, 2014, p.30]. Ésta es una manera de concretar la separabilidad entre el sistema y el dispositivo de medida necesario para dar cuenta de la observación. Por el contrario, cuando estudiemos el planteamiento de la interpretación existencial veremos que se propone una emergencia conceptual del marco descriptivo clásico al que no pertenecen los estados cuánticos desde los que se parte.

En segundo lugar, Zurek piensa que Bohr admitiría el estudio de la frontera que separa el mundo clásico del cuántico²³⁶ y también sostiene que esa frontera cuántico-clásico no está bien definida, ya que la transición no es abrupta como demuestran los experimentos con átomos en cavidades o los de interferometría de moléculas de fullereno²³⁷. Es decir, se presentan grados distintos de entrelazamiento dependiendo del aislamiento entre el sistema y el entorno. En consecuencia, el límite entre el ámbito clásico y el cuántico es ciertamente difuso. Lo que no parece tan claro es que Bohr pudiera admitir una frontera indefinida entre lo clásico y lo cuántico, como afirma Zurek [1993, p. 311], salvo que dicha “indefinición” estuviera relacionada con no haber fijado el marco experimental. Es decir, como afirma Zinkernagel, una perspectiva epistemológica estaría relacionada con la posibilidad de desplazar el límite clásico-cuántico dependiendo del marco experimental puesto que “no hay una respuesta independiente del contexto a la pregunta de qué es un objeto (clásico o cuántico)” [2011, p.222]. Ahora bien, estamos de acuerdo con este autor [2016] cuando defiende que, para Bohr, el dispositivo de medida o parte de él es clásico. Esto significa que las relaciones de incertidumbre se aplicarían sólo a parte del dispositivo experimental [Bacciagaluppi, 2014, p.30] y, por consiguiente, el estudio de los fenómenos según Bohr requeriría también de la participación del ámbito clásico tanto en la elección del marco de las medidas como en su constitución. Esta conclusión parece reforzarse si recordamos que, según Petersen, Bohr no suscribe el punto de vista de Everett porque,

²³⁶Ver Zurek [1991, p. 31; 44], [2007, p.25].

²³⁷Ver, por ejemplo, [Haroche, 1998] y, para un estudio global, consultar [Schlosshauer, 2007, cap.3].

en esta interpretación no hay lugar para las medidas y éstas indefectiblemente acontecen en el marco espaciotemporal clásico. Es decir, en situación de completa definición donde no hay lugar para las superposiciones macroscópicas, lo que “disolvería” el problema de la medida [Zinkernagel, 2016, p. 13]. En consecuencia, estamos ante una interpretación híbrida cuántico-clásico del proceso de la medida en la que la relación entre los dos ámbitos es epistémica o, como hemos advertido más arriba, incluso lingüística, pues los conceptos clásicos funcionan de manera autónoma y se suponen anteriores a la propia teoría cuántica. Si el programa de Zurek no introduce de manera velada el mundo clásico en su descripción del fenómeno, entonces la primacía de los conceptos clásicos podría no ser necesaria aunque se requieran para la práctica experimental.

Así pues, el formalismo matemático de la mecánica cuántica no permitiría una interpretación intuitiva de acuerdo al modo clásico, sino que trataría únicamente de establecer relaciones entre observaciones obtenidas en condiciones bien definidas [Bohr, 1964, p.88] y una parte del proceso de medida sería inanalizable bajo una descripción espaciotemporal. Con otras palabras, si Bohr hubiera aceptado la presencia de un colapso físico en el proceso de medida, cosa que al parecer no hizo²³⁸, éste no sería accesible experimentalmente. Recordemos que Bohr afirma que no es posible encontrar una imagen pictórica del mundo al modo y manera de la física clásica. Simplemente, se podría mostrar la eficacia de la terminología clásica para objetivar las propiedades bajo ciertas condiciones de aplicabilidad limitadas por el cuanto de acción. Esto significa que la generalización de la forma clásica de descripción requiere tomar todas las especificaciones en términos clásicos de los sistemas bajo los distintos montajes experimentales mutuamente excluyentes. En este sentido, Bohr considera que la mecánica cuántica constituye una descripción completa.

De lo anteriormente expuesto se podrían sacar conclusiones sobre lo que Bohr piensa respecto a la naturaleza de la función de onda²³⁹.

En primer lugar, parece que es razonable admitir que, atendiendo a los argumentos precedentes, el físico danés no aboga por una interpretación óptica del estado cuántico del sistema, ya que, en tal caso, el campo representado matemáticamente por la función de onda se desplegaría en el espacio de configuración que en general es mayor de tres dimensiones [Zinkernagel, 2016, p. 13]. Por tanto, no hay una representación del mundo en sí pues, como hemos advertido antes, Bohr claramente niega la posibilidad de una visión pictórica del proceso de medida.

En segundo lugar, se presenta la posibilidad de que Bohr defienda una interpretación epistémica del estado cuántico. En este enfoque se deben diferenciar tres variantes, a

²³⁸Según Zinkernagel [2016, p. 11], el concepto de colapso en Bohr puede entenderse como parte del formalismo y no un proceso físico.

²³⁹Recordemos que la función de onda representa matemáticamente la amplitud, relacionada con el cálculo de las probabilidades, de que un sistema tenga ciertas propiedades: por ejemplo, la función de onda de las posiciones $\psi(x)$ y de los momentos $\tilde{\psi}(p)$ facilitarían el cálculo de las propiedades correspondientes. Es decir, la función de onda representa una manera de “cartografiar” el estado físico, que es una especificación completa de todas las propiedades físicas del sistema en un momento concreto.

saber: (1) las interpretación estadística, que adscriben el estado y su correspondiente representación a conjuntos estadísticos y no a entidades individuales; (2) la interpretación que asigna el conocimiento del estado del sistema derivado de una interacción no física - e.g. mente del observador- y (3) aquellas interpretaciones en las que se rechaza la posibilidad del conocimiento del mundo en sí y en las que la mente proporciona el elemento conceptual que se impone sobre los sentidos generando el mundo fenoménico²⁴⁰.

Bohr rechaza claramente los dos primeros tipos de interpretación epistémica de los estados cuánticos: el primero en oposición al planteamiento de Einstein y el segundo se suele atribuir, entre otros, a una fase del pensamiento de Heisenberg [Faye y Folse, op.cit., 8], pues para Bohr el observador es otro sistema físico y no pertenece a la esfera de lo mental en forma de consciencia. Su papel queda relegado a seleccionar las propiedades a medir mediante la selección del montaje experimental.

En este sentido, como veremos, cuando Zurek introduce la conciencia del observador en frases como “la redefinición del estado del observador” o que los observadores son “conscientes del contenido de su memoria” ya que “ el observador es lo que conoce”²⁴¹, no está siendo fiel al pensamiento de Bohr.

En la tercera versión de la interpretación epistemológica, se deben diferenciar las de inclinación trascendental kantiana de las pragmáticas con variantes algunas tendentes a la explicación naturalizada. En la primera, ya comentada, parece que la “lección epistemológica” implica que la mente ordena los datos empíricos conforme a las categorías clásicas, necesarias y universales, generando el ámbito accesible de los fenómenos. Algunos autores sostienen que desde una interpretación postkantiana, la función de onda sería más bien simbólica entendida como representación del estado cuántico, con ciertas implicaciones ontológicas en su papel en la explicación [Zinkernagel, 2016, p.5].

La segunda apela a una justificación pragmática y utilitaria que en algunos casos se fundamenta en la biología evolutiva. Con otras palabras, los conceptos serían el producto de nuestra historia filogenética de interacción con el ambiente.

Creemos que esta última interpretación, están condicionada por la versión actualizada de la interpretación de Copenhague²⁴² que sostienen, entre otros, algunos físicos dedicados a la computación cuántica - h.e., el bayesianismo²⁴³ (*Qbism*) -. Como afirma David Mermin, en ningún momento Bohr adscribió una interpretación subjetiva del observador como

²⁴⁰[Faye y Folse, 2017, p.3].

²⁴¹[apud. Jannsen, 2008, p.107].

²⁴²Incidentalmente, en lo que respecta a las interpretaciones sobre el pensamiento de Bohr, sería tal vez posible establecer una analogía con el problema de interpretar qué sea el darwinismo pues, en la línea de lo expresado por Dieter Zeh, actualmente una parte considerable de teóricos se arropan bajo el manto de Bohr al sugerir que sus interpretaciones son lo que en esencia quiso decir el físico danés. Ver, por ejemplo [Carmilleri, 2009, p. 300].

²⁴³El bayesianismo se puede entender en dos sentidos, la utilización instrumental del teorema de Bayes y la interpretación subjetiva de la probabilidad. El bayesianismo cuántico es partidario de la interpretación de la probabilidad como grado de creencia subjetiva del agente. La función de onda es el instrumento para calcular dichas probabilidades. Ver [Fuchs, 2007; 2010].

“agente epistémico individual”²⁴⁴ que reactualiza continuamente sus expectativas utilizando la teoría cuántica para reubicarse en el entorno.

Por último, se ha tildado la filosofía de Bohr de instrumentalismo y operacionalismo, quizá derivada de la relación que mantuvo con el empirismo lógico, por ejemplo por su pertenencia al comité para la Unidad de la Ciencia²⁴⁵. Sea como fuere, parece claro que el programa de decoherencia y la interpretación de Bohr no coinciden en el significado que adscriben al concepto de “clasicidad”. Para los primeros, los denominados estados “cuasi-clásicos” no son más que un tipo particular de estados cuánticos - recordemos que el estado reducido no es más que una mezcla impropia- del que se pretende que emerja el marco descriptivo clásico. Para Bohr, los estados clásicos son aquellas propiedades propias de la física clásica como la posición, el momento lineal o angular, la energía, la polarización, etc.

Como hemos visto, para Bohr, la relación entre lo clásico y lo cuántico implica llevar el principio de correspondencia al límite para poder salvaguardar el uso análogo de los conceptos clásicos pues los montajes experimentales diseñados dependen de estos conceptos propios de la física clásica y no de la cuántica. Pero, nadie selecciona el dispositivo de medida en la naturaleza. Esta circunstancia reclama una explicación desde el planteamiento de Bohr. Para Zinkernagel [2016, p.18] la explicación de la estabilidad de la materia -h.e. la estabilidad atómica- garantizada en parte por las relaciones de indeterminación, implica la fijación del sistema de referencia al que referir las medidas de la medida del valor esperado, o lo que es igual, requiere tomar un sistema de referencia clásico.

6.2. La naturaleza de los estados cuánticos

En esta sección se van a exponer los posibles compromisos que adquiere la interpretación existencial. Este estudio es necesario si se quiere analizar y evaluar la analogía material del Darwinismo Cuántico.

Como se ha advertido en la sección 6.1, Zurek parte de considerar a los observadores internos a la dinámica cuántica del sistema abierto. En la formulación del estado relativo, los observadores percibirían el estado del universo con referencia a su propio estado [Zurek, 2018, p.2]. En consecuencia, no tiene lugar el colapso físico pues tanto la solución al problema de la ambigüedad de la base, resuelta mediante los procesos de decoherencia y de selección inducida por el entorno, como la explicación del origen y naturaleza de las probabilidades dan cuenta de la hermiticidad de los observables, los saltos cuánticos y la ruptura de la simetría pero no quiebran la evolución unitaria.

En este contexto, Zurek se pregunta por el origen cuántico de los resultados “clásicos”. La posibilidad de la “existencia objetiva” de algunos estados cuánticos caracteriza la “clasicidad” como capacidad de acceder a la información sin perturbar el estado del sistema

²⁴⁴Mermin en [Faye y Folse, 2017, cap. 16].

²⁴⁵Segundo Congreso Internacional para la Unidad de la Ciencia que tuvo lugar en Copenhague del 21 al 26 de junio de 1936 [Stadler, 2010, p. 385-387].

pues, recordemos que en general la interacción cuántica significa una nueva preparación del estado.

El Darwinismo Cuántico facilita la accesibilidad a la información del sistema sin perturbarla pues los estados puntero mantienen una correlación cuántica estable con los estados de los fragmentos del entorno. En consecuencia, la repetibilidad -el postulado físico- y la estabilidad, son condición necesarias para la “existencia objetiva” pues la información sobre los estados puntero debe ser: inalterable, abundante y fácil de “encontrar”. La redundancia de la copia, basada en la información mutua cuántica, será “la medida de objetividad” porque nos informa del número de fragmentos del entorno cuyo estado se encuentra correlacionado con el del sistema y que, por tanto, pueden ser obtenidos por los distintos observadores. De esta manera, estos fragmentos del ambiente nos revelan una sola rama en el sentido de Everett. Así pues, en la dinámica abierta entre sistema, entorno y observador, el Darwinismo Cuántico sería el proceso responsable de la amplificación y el inductor de la estructura de las ramas [ib., 19].

Ahora bien, una cosa es ser el inductor y otra, bien distinta, el único responsable de la estructura de ramificación. La razón fundamental es que al final de la cadena se encuentra siempre el observador que, como sistema cuántico, debe participar en la arquitectura de ramas a no ser que ésta estuviera fijada de antemano por la función de onda universal para toda la eternidad o que el Darwinismo Cuántico fuera el único proceso dinámico que la determinara. En todo caso, para concluir la medida, parece que es imprescindible cómo se gestiona la multiplicidad. Por ejemplo, se puede modificar el formalismo añadiendo muchos mundos, cosa que Zurek descarta [ib., 22], o asociar a cada observador un conjunto de estados mentales -cada uno con una experiencia bien definida- como en el enfoque de las múltiples mentes. En definitiva, se debe aclarar si el observador es, o no, agente en la ramificación y, para evitar introducir implícitamente el mundo clásico, se requiere establecer de manera explícita la estructura de la partición entre sistema, entornos y observadores.

Por lo expuesto, parece que, para Zurek, el resultado de la medida no preexiste sino que, más bien, sería mejor pensarlo como “una descripción de la información que el observador tiene” [ib., 4], aunque Zurek no admite que esto obligue a una interpretación subjetiva. Con sus propias palabras, no implica negar la “existencia bajo cualquier circunstancia” [ib., 5]. No obstante, es evidente que, como en el caso de Everett, sigue pendiente el problema de explicar cómo surge la experiencia de un sólo resultado.

Es posible enunciar los tres aspectos sobre los que se enmarcará la interpretación existencial:

- 1.- Aunque la explicación se circunscribe a la predicción de la percepción, Zurek parece sugerir que, el formalismo es capaz de representar el proceso de transición cuántico clásico mediante una estructura causal.
- 2.- Principio ontológico: el mundo es cuántico. No obstante, Zurek no se compromete con la naturaleza óptica o epistémica de los estados cuánticos.

- 3.- La emergencia del mundo clásico es epistémica y se conserva la objetividad gracias al acceso intersubjetivo de los observadores a los fenómenos.

Empecemos el análisis por el último punto. Como se ha advertido, para liberar a la nueva física del subjetivismo y del solipsismo, se puede proponer una salida en términos de la gnoseología: conocer mediante la intuición analógica presente en los conceptos clásicos. Ahora el problema, en palabras de Bohr, es obtener “una descripción objetiva de la experiencia, que, para nosotros, no es otra cosa que una comunicación sin ambigüedad” [Bohr, 1964, 83].

La diferencia entre el enfoque de Bohr y la interpretación existencial es que el físico danés considera al observador exterior a la interacción entre sistema y dispositivo de medida. Más concretamente, no hay lugar para que el entrelazamiento se extienda al dispositivo de medida al completo. Por contra, en el Darwinismo Cuántico, interpretado bajo el marco everettiano [Zurek, 2011, p. 107], el observador es un sistema interno al proceso de medida. Es decir, el proceso de transferencia de la información está participado por el sistema, el entorno y el observador [í.d.], de tal suerte que se genera una estructura de ramificación fruto de la correlación entre los distintos subsistemas componentes. Por eso Zurek afirma que “Aquí los observables preferentes no están definidos por los aparatos clásicos sino por la dinámica abierta del sistema” [2007a, p.7].

Como hemos apuntado más arriba, desde el punto de vista de la interpretación existencial, Zurek afirma que sólo hay un mundo, cuya naturaleza es cuántica [Zurek, 2011, p. 179]. A la vez sostiene que sólo una de las componentes de la estructura de ramificación, fruto de la linealidad aplicada al sistema multicomponente, coincide con “nuestro mundo”: el resto de las ramas pueden ser interpretadas como información pues “las otras ramas no son reales, al menos no tan reales como «nuestra» rama.” [Zurek, 2011, p.107]. Observamos en estas afirmaciones cierta ambigüedad. Si interpretamos bien estas palabras de Zurek, parece defender que nuestra rama es la que explica la experiencia ordinaria pero, también nuestra rama se determina a partir de la información. De aquí parece seguirse que hay dos tipos de información, la perdida y la percibida, aunque su naturaleza sea la misma. Pero esta distinción parece convencional ya que, en un planteamiento everettiano, no se puede descartar que “alguien en algún mundo” con un conjunto de estados mentales diferente registre esa información que para otro mundo se habría “perdido”. Con este concepto de información epistémico no hay manera de descartar la multiplicidad ontológica.

Veamos, la interpretación existencial viene sugerida por los procesos de selección inducida por el entorno pues, para Zurek, la “existencia” está relacionada con la persistencia de ciertos estados a pesar de la interacción ambiente [ib., 86]. Pero Zurek califica esta “existencia” como objetiva relativa a los observadores. Es decir, tanto a su rama como a la posibilidad de obtener una experiencia intersubjetiva.

En la exposición de Zurek, los conceptos existencia, objetividad, observador y realidad toman un significado muy distinto al de la física clásica.

Comencemos por la objetividad. Parece evidente que el criterio de descripción objetiva de la experiencia de Bohr como comunicación sin ambigüedad sustentada en conceptos inequívocos está en la base de la formulación operacional de la objetividad propuesta por Olliver, Poulin y Zurek [2005, p.1]:

“Una definición operacional de objetividad para una propiedad de un sistema cuántico no debe basarse en la preexistencia de una realidad subyacente como se presupone en un ámbito clásico. Por el contrario, exigimos que una propiedad objetiva del sistema de interés debe ser:

- 1.- Accesible simultáneamente a muchos observadores,
- 2.- quienes deberían ser capaces de descubrirla sin conocimiento previo y
- 3.- que deberían llegar a un consenso al respecto sin un acuerdo previo.”

Esto significa que, para la interpretación existencial, la objetividad derivada de la intersubjetividad de la descripción de los objetos depende de los fenómenos y en última instancia del lenguaje y no de una ontología de entidades independientes. Por tanto, las propiedades no lo son de los sistemas sino del estado de los fenómenos y éstos son fruto de la observación. Aunque, evidentemente, el concepto de observación no sea el de la física clásica.

En este sentido, Zurek sostiene que:

“La interpretación existencial de la teoría cuántica asigna «existencia objetiva relativamente» [y es por tanto], “consistente con la interpretación del estado relativo: la redundancia de las grabaciones diseminadas en el entorno suministra una definición natural de las ramas que son clásicas en el sentido de que un observador puede encontrar las características macroscópicas de la rama y permanecer en ella” [Zurek, 2007a, 24].

Dicho de otra forma, la percepción se produce gracias a que el Darwinismo Cuántico ha hecho posible “la existencia objetiva relativa de las grabaciones” en el entorno, lo que supone una condición previa para su procesamiento clásico [Zurek, 1998, p.21]. Aquí, Zurek parece admitir finalmente la participación de un proceso clásico. Esta afirmación podría contradecir la primacía ontológica del mundo cuántico. Dicho con otras palabras, en esta cita Zurek parece abrazar la afirmación de Petersen [*ut supra*] sobre la necesidad de que la observación tenga lugar en el mundo clásico. No obstante, esta conclusión en general no sería coherente con el programa de Darwinismo Cuántico.

Así pues, Zurek debe decidir cuál es el papel de los conceptos clásicos pues la objetividad no está asociada a los objetos independientes del observador sino a los fenómenos.

Para intentar aclarar esta cuestión, es necesario estudiar con más detenimiento la naturaleza de dicha “existencia objetiva”.

En primer lugar, Zurek hace un uso predicativo de la palabra “existencia”²⁴⁶. Como es conocido, en la “Crítica de la razón pura”, Kant afirma que la existencia no es un predicado real [2011, p. 549; B 626 y ss.]²⁴⁷. No es un concepto que podamos adscribir al concepto de cosa u objeto, aunque sí es un predicado lógico en el sentido de aplicable a conceptos. Dicho de otra manera, es gramaticalmente correcto. Por tanto, el argumento de Zurek no sería concluyente según la lógica tradicional.

En la lógica moderna, Gottlob Frege y, posteriormente, Bertrand Russell introducen en su teoría de las descripciones el cuantificador existencial que evita llegar a contradicciones en la formulación lógica de “existir” y de “x es a”. Según la transcripción a notación lógica, el argumento de Zurek se puede representar de la siguiente manera: si E está por “estado” y R por “robusto” entonces: $(\exists x)[E(x) \wedge R(x)]$. De aquí no se sigue la existencia de dicho estado. Es decir, la siguiente inferencia es errónea según la lógica de primer orden:

$$(\forall x) [x \text{ es un estado robusto} \implies x \text{ existe}] \implies (\exists x) (x \text{ es un estado robusto}).$$

Veamos, si “x es un estado robusto” lo representamos por $\psi(x)$ y “x existe” por $\phi(x)$, entonces:

$$(\forall x) [\psi(x) \implies \phi(x)] \not\Rightarrow (\exists x) \psi(x).$$

Al margen de esta cuestión lógica, para que la definición operacional de objetividad y el criterio de existencia objetiva solucionen el problema grande de la medida es necesario posicionarse en cuestiones relacionadas con la filosofía de la mente, donde se pueda lidiar con el problema de la relación entre estados físicos cerebrales y los estados mentales. Si no se adquiere un compromiso filosófico en esta última cuestión, entonces no se podría explicar:

“la habilidad para procesar información sobre los estados de los objetos externos a la memoria (para la predicción clásica, por así decirlo) se basa en el establecimiento de correlaciones entre los bit grabados en la memoria y el estado del objeto” [2007a, p.17].

Es decir, Zurek defiende que la percepción de un resultado único se debe a “la redefinición del estado del observador” [apud. Jannsen, op.cit, p.107] lo que implica la sensación de colapso y saltos cuánticos. De esta manera, los observadores son sistemas cuánticos muy especiales, próximos al servomecanismo referido por Everett, puesto que la clave de su naturaleza reside en que son “conscientes del contenido de su memoria” ya que “el observador es lo que conoce”[í.d.].

Esta postura parece confirmar que, al introducir el concepto de consciencia, el concepto de percepción de la interpretación existencial requiere tomar partido por alguna de las propuestas de filosofía de la mente como acabamos de señalar. De hecho, sería posible

²⁴⁶Como observa [Camilleri, 2009, p.298]. Para un estudio lógico sobre la “existencia”, consúltese [McGinn, 2000, cap.2].

²⁴⁷“[...] Todo lo que uno quiera puede servir de predicado lógico; hasta el sujeto puede predicarse de sí mismo; pues la lógica hace abstracción de todo contenido. [...] Ser no es, evidentemente, un predicado real, es decir, un concepto de algo que pudiera añadirse al concepto de cosa. es mera posición de una cosa. En el uso lógico es la cópula de un juicio”[Kant, 2011, 549 y ss.].

buscar soluciones similares a interpretaciones del tipo “una o muchas mentes” [Albert y Lower, 1988; Lockwood, 1996], puesto que para Zurek, la función de onda no colapsa y no propone variables añadidas (ocultas).

No obstante, Zurek no admite que la función de onda del universo sea una entidad real. Esto se debe a que, como vimos, no desea “atribuir ‘realidad a todas las ramas’ del vector de estado universal” [op. cit., 2007, p. 26], puesto que el estado real “se define y objetiva gracias a lo que se conoce sobre él” [2002, p. 22]. Esto significa que las supuestas “características ontológicas” de los vectores de estado se adquieren “ [...] a través de la ‘transferencia de información’ epistemológica” [íd.] entre sistema, entorno y observador. Pero si “sólo puede adquirir existencia mediante ‘promocionarse a si mismo’ en el entorno” [op. cit. 2007a, p.26], entonces la consecuencia directa es que el universo al completo representado por la función de onda no “existe” en el sentido operacional de Zurek puesto que es un sistema cerrado. Esta conclusión podría tener consecuencias importantes para la cosmología cuántica, e.g. no podríamos tener conocimiento objetivo - intersubjetivo - del universo al completo.

En este punto, sería conveniente resumir algunas conclusiones tentativas generales a la interpretación existencial:

- 1.- A primera vista, Zurek parece descartar el realismo de la física clásica en el que las propiedades pertenecen a los sistemas físicos. Esto se debe a que parte de los fenómenos, que en este caso incluirían el sistema, el entorno y el estado mental del observador. Por esta razón, su criterio de realidad característico del estado como “[...] la posibilidad de ser encontrarlo sin perturbarlo” [Zurek, 1998, p.5] no garantiza una objetividad de realidad en el sentido clásico, h.e como descripción independiente del sujeto y de las circunstancias empíricas.
- 2.- Los conceptos clásicos podrían usarse de manera análoga asintótica, pero ahora apoyándose, no en el principio de correspondencia, sino bajo la idealización que decoherencia impone en el límite de los infinitos grados de libertad del entorno. No obstante, la interpretación existencial debería aclarar su posición sobre aspectos relacionados con la filosofía del lenguaje para fijar el nuevo significado y uso de los conceptos clásicos.
- 3.- A consecuencia de lo anterior, las propiedades no se pueden referir a los objetos representados por los conceptos clásicos. Éstas se refieren a los fenómenos. Ahora bien, los estados puntero siguen siendo cuánticos, aunque muestren estabilidad suficiente para simular el comportamiento clásico.
- 4.- Del punto anterior se infiere que las “características ontológicas de los vectores de estado” no pueden ser las de la física clásica. Esto es, no son las propiedades de los objetos clásicos.

- 5.- Por lo que acabamos de decir, el proceso de filtrado del entorno y el Darwinismo Cuántico no cambian la naturaleza ontológica de los estados a los de la física clásica, a pesar de poder usar los conceptos clásicos en el límite inalcanzable de los infinitos grados de libertad, donde se recuperaría la estructura espaciotemporal propia de la descripción clásica.
- 6.- La transferencia de información (epistémica) entre sistema, entorno y observador, que sería la responsable de esas “características ontológicas” emergentes de los vectores de estado, no corresponde al proceso de medida como transferencia de información de Shannon, pues esta última es sintáctica y no epistémica. Se ocupa de la capacidad de transmisión de datos por un canal independiente de si tiene o no contenido semántico [Floridi, 2010].

Esta última consideración es muy relevante porque, como hemos visto, la interpretación existencial parece estar fuertemente condicionada por el uso del concepto de información y las distintas relaciones que mantiene este término con otras ramas de la física, por ejemplo con la termodinámica. De hecho, el proceso de medida cuántico sería análogo al de irreversibilidad termodinámico gracias a la conexión entre información y termodinámica [Zurek, 2011, p.194].

Zurek afirma que la información es un término de alto nivel. Cree que el concepto físico clave es el de simetría como fuente de la ignorancia objetiva [íd.]. No obstante, es en el uso que Zurek hace del concepto de información donde se pueden encontrar algunos de los problemas que presenta su interpretación. Por ejemplo, cuando parece confundir el concepto de estado y el de correlación, al sostener que los estados son una “forma abreviada” de hablar correlaciones multipartitas [Zurek, 1998, p.14].

Más concretamente, Zurek sostiene que la transmisión de información - epistémica y no sintáctica- es el proceso que explica transformaciones de tipo ontológico, siguiendo el famoso lema “It from bit” [Wheeler, 1990, p.5]. Ésta fue la manera con la que J.A. Wheeler quiso simbolizar la idea de que

“ cada cosa - cada partícula, cada campo o fuerza, incluso el propio espacio-tiempo continuo - deriva de su función, su significado, su propia existencia (incluso indirectamente en algunos contextos) enteramente en la respuesta de los aparatos ante preguntas si o no., elecciones binarias, bits.” [íd.].

Es más, Wheeler sostiene explícitamente la idea de que:

“cada item del mundo físico tiene en su base - en una base muy profunda, en la mayoría de los casos- una fuente y explicación inmaterial; que lo que denominamos realidad surge en último análisis del planteamiento de preguntas si-no y de respuestas evocada por los equipos de medida; en pocas palabras, todas las cosas físicas son informativo-teóricas en origen y éste es un universo participativo”[íd.].

Dicho de otro modo, Zurek, adscribiéndose a esta idea en [2009, p.9], no sólo estaría tomando partido por una ontología del discreto sobre el continuo, sino que podría estar asumiendo un monismo metafísico de corte pitagórico, basado en datos de naturaleza inmaterial, del que surgiría la imagen manifiesta fruto de procesos puramente formales. Ésta es una de las claves para entender el papel que juega el concepto de transferencia de la información en la interpretación existencial para explicar en términos del denominado “darwinismo universal de procesos”: en última instancia cualquier proceso se puede reducir a un algoritmo de tipo darwinista²⁴⁸ que procesa información.

En lo hasta aquí referido, sugerimos, tentativamente, las posibles influencias de distinta tradición interpretativa, no siempre compatibles, que pueden estar implícitas en la interpretación existencial: (1) el enfoque epistemológico de Bohr basado en la filosofía del lenguaje como fundamento al concepto intersubjetividad para explicar la “objetividad” de la imagen manifiesta; (2) las propuestas centradas de solución procedentes de la filosofía de la mente que podrían derivar en un dualismo ontológico en la línea de las interpretaciones de von Neumann y Wigner; (3) el formalismo de la interpretación del estado relativo que despliega la posibilidad de elaborar una interpretación basada en el papel central de la información para explicar los saltos cuánticos, la irreversibilidad en la medida y el origen de la probabilidad; y, por último, (4) el monismo metafísico de tipo pitagórico de Wheeler, que define la realidad en términos de pura relación y procesamiento de datos inmateriales, al estilo de las mónadas leibnizianas, y cuyo fundamento ontológico es de corte noético en la línea de Berkeley²⁴⁹.

Dependiendo de las distintas posiciones interpretativas que adscribamos a Zurek, podría incluso formar parte del grupo de investigadores de la información cuántica que proponen una versión renovada de la interpretación de Copenhague con cierta orientación pragmátista²⁵⁰. En efecto, Zurek insiste en que su enfoque no se preocupaba por “lo que son los estados cuánticos, sino en lo que hacen.”[Zurek, 2009, p.9]. A la misma corriente pertenecerían Christopher Fuchs [2007 y 2010], con quien Zurek compartiría su simpatía por la epistemología darwinista, y Anton Zeilinger, compañero en su objetivo de encontrar una explicación “realista” inspirada en el monismo metafísico aludido [Norsen, 2017, p.171].

Todos estos autores presentan una fuente directa de influencia común, el magisterio de John Archival Wheeler. En efecto, pensamos que la orientación darwinista del pragmatismo de estos teóricos no es una versión pragmátista del pensamiento de Bohr sino la cognitiva naturalizada propagada, entre otros, por su amigo y colaborador Wheeler²⁵¹.

²⁴⁸Para un análisis metafísico al respecto, se puede consultar [von Sydow, 2012].

²⁴⁹Para un análisis, consultar [Floridi, 2011, cap. 14].

²⁵⁰Para un estudio del problema del realismo, el pragmatismo y el instrumentalismo en relación al cisma de la física consultar [Rivadulla, 2015, cap. V].

²⁵¹Defenderemos esta postura en una próxima publicación. Sea suficiente por ahora señalar que Wheeler fue lector asiduo y seguidor de la obra de W.James y a la vez admirador de Charles Darwin. Véase [Wheeler, 1992, p. ; 2000, pp. 349-351] y Zurek [2004, p. 123].

En resumen, aunque Zurek sostiene que no se puede “saber lo que son los estados cuánticos” [Zurek, 2011, p. 108], parece admitir que los clásicos poseen la misma naturaleza ontológica. Aunque se empeñe en afirmar que los estados cuánticos adquieren propiedades ónticas al transformarse en clásicos, las diferencias entre estados clásicos y cuánticos es de índole epistémica. Además, la interpretación existencial suscribe la máxima pragmática de que “los estados son lo que hacen” y, por tanto, se pueden distinguir los estados cuánticos de los clásicos porque los primeros:

- 1.- Ante las operaciones de medida son “frágiles” puesto que, en general, se ven perturbados por ella y, lo que implica que, los estados cuánticos desconocidos no son clonables -reproducibles- [Wooters y Zurek, 1982].
- 2.- No siempre son distinguibles. Recuérdese que sólo los estados ortogonales son perfectamente distinguibles.
- 3.- Pueden estar en superposición debido a la completud y la evolución líneal.
- 4.- Los estados de los sistemas multicomponente pueden encontrarse entrelazados. Esta propiedad exclusivamente cuántica, que viene corroborada por la violación experimental de las desigualdades de Bell, pone en evidencia la pérdida de individualidad de los subsistemas de un sistema multicomponente.

Ahora bien, no sabemos de qué manera pueden adscribirse estas propiedades a los estados cuánticos independientemente de los marcos de medida dada su inaccesibilidad empírica. Con otras palabras, no podemos acceder a las correlaciones cuánticas de forma directa, pues la información se obtiene a través de sus efectos en las medidas (e.g. interferencias).

Lo que demuestra la nueva experimentación en tecnologías cuánticas es que los efectos empíricos, explicables mediante la teoría cuántica, pueden mantenerse incluso a escala macroscópica dependiendo del grado de aislamiento del entorno²⁵².

Podemos concluir como corolario a este análisis, que el problema no es sólo, como afirma Janssen [op.cit, p. 64], que se aprecie una tensión no resuelta entre las concepciones óntica y epistémica del vector de estado, pues Zurek no esconde esta dificultad²⁵³. Más bien, pensamos que el problema reside en que Zurek desea encontrar una solución “realista” de la mecánica cuántica pero sin adquirir compromisos ontológicos sobre la naturaleza de los estados cuánticos.

²⁵²Tomándose por tal, los grados de libertad tanto internos como externos al sistema bajo estudio.

²⁵³“Explorar la naturaleza dual «epi-óntica» de los estados cuánticos (que nos dice lo que sabemos, pero también ayuda a definir lo que es) [...]. Y cualquier presión para llegar a una interpretación que intente eludir todo el arduo trabajo esencial para responder a estas preguntas intermedias es, en el mejor de los casos, contraproducente. La precipitación no es buena consejera.” [Zurek, 2011, p.86] .

6.2.1. Interpretación existencial y modelos ontológicos

Como acabamos de ver, el problema central de la interpretación existencial es que no fija claramente cuál es la naturaleza física de los estados cuánticos y necesitamos este dato para analizar la plausibilidad de la analogía formal con el darwinismo.

En efecto, hemos visto en la primera parte cómo Darwin explica mediante “un largo argumento” la estructura causal del cambio y adaptación de las especies. Para que su análogo cuántico pueda suponer una explicación descriptiva de la estructura causal efectiva del proceso de transformación entre los estados cuánticos y los clásicos, se requiere que los estados cuánticos sean de tipo óntico. Es decir, independientemente de la categoría ontológica a la que pertenezcan -si es que es una de las conocidas-, los estados cuánticos deben “estar en el mundo”, sea éste el que fuere, para tener propiedades causales.

Así pues, como la analogía formal que vamos a analizar reposa en el modo material, pues las poblaciones darwinianas están formadas por individuos distintos que presentan variación, cuyos descendientes pueden heredar, necesitamos saber si hay alguna forma de establecer el estatuto óntico o epistémico de los estados cuánticos.

En la caracterización propuesta por Harrigan y Spekkens [2010], se proponen dos tipos de modelos ontológicos²⁵⁴: el primero²⁵⁵, lo constituyen los estados denominados $\Psi_{\text{óntico}}$, si “todos los estados físicos completos en la teoría son consistentes con un sólo estado cuántico puro”. El estado representará alguna propiedad física de un sistema individual. La mecánica clásica constituye el ejemplo más sencillo de teoría puesto que el punto del espacio de las fases posición y momento (x, p) representa el estado $\Psi_{\text{óntico}}$ del sistema que corresponde objetivamente a las propiedades de las partículas independiente de los agentes. Los estados $\Psi_{\text{óntico}}$ refieren a algo que se encuentra en el mundo.

El segundo modelo ontológico se denomina $\Psi_{\text{epistémico}}$ y se definen por contraposición a los $\Psi_{\text{óntico}}$, como aquellos “[...] estados ónticos que son consistentes con más de un estado cuántico puro”. Esto significa que un estado óntico puede estar en más de un estado epistémico [Leifer, 2014, p.6]. En el ejemplo de la física clásica, si hay cierta incertidumbre en la posición y el momento, es posible establecer una distribución de probabilidad sobre el espacio de las fases. Esta distribución de probabilidad es un ejemplo de estado $\Psi_{\text{epistémico}}$.

Por tanto, la característica principal de los estados epistémicos es su afiliación a una distribución de probabilidad, con independencia de su interpretación. Así pues, los modelos con $\Psi_{\text{epistémico}}$ en la teoría cuántica, corresponden a una forma de categorizar la función de

²⁵⁴Un modelo ontológico es aquél basado en una aproximación a la mecánica cuántica operacional. Esto es, aquella que trata de preparaciones de medidas en vez de estados y de medidas, asociadas a los conjuntos de operadores POVM, que se calculan mediante la regla de Born. Las propiedades microscópicas de los sistemas representan las descripciones primitivas, pues dependen de las preparaciones y éstas se montan dependiendo del tipo de propiedades a estudiar. El conjunto completo de especificaciones de esas propiedades del sistema se denomina estado óntico del sistema λ . Las probabilidades están pues determinadas por el estado óntico $P(k/\lambda)$. Si λ determina ψ entonces se dice que $\psi_{\text{óntico}}$, éste puede ser completo cuando $\lambda = \psi$ o incompleto -si requiere de alguna variable añadida. En caso de no ser $\psi_{\text{óntico}}$ se denomina epistémico.

²⁵⁵[Pusey et al. 2012, pp. 476-479].

onda en la que no se asignan propiedades a sistemas físicos individuales²⁵⁶.

Hay distintas maneras de entender la distribución de probabilidad. Por ejemplo si la función de onda representa a un colección de sistemas o una preparación. Éste es el caso de los estados epistémicos denominados $\psi_{\text{estadísticos}}$. Bajo esta etiqueta es posible asignar un estado al sistema individual pero no es independiente del conjunto estadístico al que pertenece. Por eso, este tipo de estado no constituye una representación completa del sistema físico.

Cuando la probabilidad²⁵⁷ asociada a la función de onda, se entiende como grados de creencia subjetiva de los agentes sobre los posibles resultados de las medidas, el estado epistémico se denomina $\psi_{\text{credencial}}$ [Maudlin, 2019, p.80]. Ésta es la manera de definir la naturaleza del estado cuántico para lo seguidores de la interpretación del bayesianismo cuántico (*Qbism*) e.g. [Fuchs, 2010]. Para muchos investigadores del ámbito de la computación e información cuántica, el estado cuántico (o la función de onda) no está relacionado con las propiedades de la materia en el mundo. Es decir, Ψ no es una propiedad de los objetos, eventos, etc.

La diferencia esencial entre las concepciones $\Psi_{\text{óntica}}$ y $\Psi_{\text{epistémica}}$ de la función de onda es que una variación en la función de onda en la primera representa una variación de la realidad, mientras que una variación en la concepción $\psi_{\text{epistémica}}$ no [Harrigan y Spekkens, 2010, p. 5].

Si ésta es una caracterización completa de la naturaleza de los estados cuánticos, el problema con los estados “epiánticos” es que, según el teorema PBR²⁵⁸, no pueden ser interpretados en términos de información, *pace* *pace* Zurek [2011, p.86]. Pues independientemente de si la información que se tenga se pueda adscribir a un sistema individual,

“ [...] los modelos en los que el estado cuántico se interpreta como mera información sobre un estado físico objetivo de un sistema no pueden reproducir las predicciones de la teoría cuántica. El resultado está en el mismo espíritu que el teorema de Bell, que establece que ninguna teoría local puede reproducir las predicciones de la teoría cuántica.” [2012, p.478]

Evidentemente, este teorema de imposibilidad no especifica qué tipo de entidad es un estado cuántico en el sentido de atribuirle una categoría ontológica conocida. Tal vez, como sugiere Maudlin [op.cit, p. 89], constituya una nueva categoría.

²⁵⁶Para una introducción completa se puede consultar [Leifer, 2014].

²⁵⁷La interpretación de la probabilidad propia del bayesianismo Cuántico es la defendida por Bruno de Finetti, en la que se presentan diversas situaciones para las que puede formularse una apuesta basada en el grado de creencia del agente. Dicha apuesta debe someterse a las denominadas condiciones de coherencia y éstas son las que se derivan de aplicar los axiomas de la probabilidad.

²⁵⁸Matthew Pusey, Jonathan Barlett y Terry Rudolph [2012]. Las críticas al teorema - e.g. [Schlosshauer y Fine, 2012] no han logrado invalidarlo. Para más información consultar [Leifer, 2014, 62-67].

Lo cierto es que, sea cual fuere la naturaleza de la función de onda, si se cumplen las condiciones del teorema PBR, no es posible un modelo $\Psi_{\text{epistémico}}$ con estado $\psi_{\text{credencial}}$ ²⁵⁹ como puro instrumento asociado al cálculo de la probabilidad entendida como creencia subjetiva del agente.

En general se presentan tres actitudes filosóficas distintas a la hora de interpretar este resultado, a saber: (1) nos informa de nuestro mundo, (2) corresponde a un mundo ficticio en el que se cumplen los resultados de la teoría cuántica y (3) estos resultados requieren de una inspección pormenorizada en una teoría más general como la teoría cuántica de campos.

Si admitimos el primer enfoque (1), la función de onda - su estructura y evolución temporal - representan alguna característica física de los sistemas individuales, y no meramente el estado de nuestra creencia sobre el estado de un sistema.

²⁵⁹Para una análisis de esta cuestión consultar [Maudlin, 2019, p.83-89].

Conclusiones

El Darwinismo Cuántico forma parte de un programa de investigación que se puede remontar a la aparición de la interpretación del Estado Relativo y la disputa abierta que Hugh Everett mantuvo con los integrantes del grupo de Copenhague.

El objetivo de Zurek es resolver el problema de la medida reconciliando las concepciones de Everett y las de Bohr. Esto significa que la representación de los sistemas físicos, sus interacciones y su evolución temporal es exclusivamente cuántica. Por tanto, el formalismo de Everett es la clave para la resolución del problema. Ahora bien, la Interpretación del Estado Relativo no ha sido capaz de explicar con claridad la diferencia entre lo cuántico y lo clásico, porque no ha investigado suficientemente su límite [Zurek, 2003, p.771]. Éste será el objetivo del programa del Darwinismo Cuántico que se sustancia en los siguientes pasos:

(1) **En un sistema cerrado distinguimos entre sistema y entorno.** Es importante recordar que, como apreciara DeWitt, no hay medida si no existen subsistemas [Everett, 1957b, p.160]. En el contexto de la interpretación del Estado Relativo, el universo se observa desde dentro. Es decir, la medida es el resultado de la existencia de correlación entre subsistemas, uno de los cuales es el observador entendido como sus estados mentales. Por lo tanto, es necesario agregar el postulado de complejidad (composición de sistemas) que introducimos en el apartado sobre la estructura de la teoría (3.3).

(2) Una vez entran los subsistemas en interacción -sistema (S)+ observador (O) + Entorno (E)- se correlacionan. O sea, se forma cadena de von Neuman. Pero, debido a la extrema complejidad del entorno, la superposición se deslocalizan en los grados de libertad del ambiente, lo que significa que las interferencias se diluyen en él, produciéndose la **decoherencia** [Zurek, W.H, 1981]. Es importante recordar que este mecanismo no opera igual con todos los estados de la superposición. La caída de las interferencias puede restringir los estados estables pero no implica que se haya producido la selección de los estados puntero²⁶⁰.

(3) Esa tarea le corresponde a la **selección inducida por el entorno** [Zurek, 1982], que desvelará los estados puntero si el operador que representa la propiedad conmuta con el Hamiltoniano de la composición S+O+E. Los estados puntero son estados del “dominio clásico”.

²⁶⁰ Como explica Zurek [Byrne, 2012, p.423], la decoherencia no siempre produce selección y los estados pueden ser “*einselected*” y no producirse la decoherencia -e.g un canal perfectamente depolarizado-.

(3') Como no suele satisfacerse la condición del paso anterior, es necesario aplicar el principio de repetibilidad de la medida, implementado a través del “**tamiz de predictibilidad**”. Éste, a su vez, se sustenta en el criterio de estabilidad: los estados más robustos a la interacción con el ambiente, aquellos que son menos perturbados²⁶¹ por éste y, por tanto, más predecibles, son los “estados preferentes” que serán los candidatos a “estados puntero”.

En términos generales, la medida se considera una operación de transferencia de información entre sistema y observador. La diferencia fundamental entre el dominio clásico y el cuántico es que en el caso del segundo, la interacción puede alterar o reparar el estado [Zurek, 2003, p.717]²⁶². Así pues, el tamiz de predictibilidad y el concepto de selección inducida por el entorno es la primera parte del estudio del corte de Heisenberg y puede servir de puente entre las concepciones de Everett y Bohr.

Así pues, coronado este paso, tenemos un estado global S+O+E completamente simétrico. Por eso, una transformación realizada en el sistema puede ser revertida por una transformación en el entorno. Esta propiedad cuántica es la invariancia de las fases asistida por entrelazamiento (*envariancia*). La transferencia de información local, en la que el observador encuentra el estado del sistema, produce la rotura de esta simetría que implica la aleatoriedad en la percepción y justifica el uso de la regla de Born como algoritmo de predicción.

En consecuencia, los observadores obtienen la experiencia ordinaria directamente mediante su correlación con el entorno de tal suerte que éste sirve de canal de comunicación. Cómo se sustancia este paso es una cuestión pantanosa. Para Zurek, los estados físicos de la memoria del observador asociados con su identidad no se pueden superponer y sirven como etiqueta de las distintas ramas [Everett, 1957]. Ellos retienen la información que éste posee del universo [op.cit., 719]. La estabilidad de las correlaciones entre los estados de memoria seleccionados (datos accesibles al observador) y los estados grabados en los sistemas macroscópicos “es todo lo que se necesita para recuperar la «realidad familiar»”.

(4) Cuando la redundancia de la información de los punteros - las correlaciones cuánticas con el entorno- tiende a infinito, emerge la naturaleza objetiva. Este último proceso concluye el armazón del puente subtendido entre la realidad cuántica y la experiencia clásica, y se puede considerar como la “implementación cuántica del acto irreversible de amplificación que fue un importante elemento en la interpretación de Copenhague” [Zurek, 2008, p.25]. El entorno es causa de la “amplificación selectiva de la información sobre los observables puntero” de forma análoga a “la reproducción que [es] la llave de la selección natural”. De ahí que este proceso se denomine “Darwinismo Cuántico”.

La no consecución del algoritmo de la medida desemboca en la necesidad de buscar una nueva suposición interpretativa entre las distintas disponibles en la literatura actual.

²⁶¹Se calcula mediante la variación de la entropía de Von Neumann, ver (4.3).

²⁶²Ésta es una alusión clara al concepto de medida entendido en el marco de Copenhague. Como ya se notó, la alteración es despreciable o se puede controlar en el caso clásico.

La interpretación existencial es el intento final por conectar el formalismo con la experiencia. Parte de un mundo cuántico en el que las propiedades clásicas serían fruto de la naturaleza epistémica de los estados candidatos a la clasicidad.

A diferencia de los estados clásicos, los estados cuánticos son (1) frágiles ante la medida, (2) no son siempre distinguibles, (3) pueden encontrarse en superposición y (4) los estados multicomponente puede presentar entrelazamiento entre subsistemas lo que implica una pérdida de sus respectivas individualidades.

Zurek afirma que la existencia objetiva de los estados clásicos, fundamentada en el criterio operacional de realidad, sería consecuencia del Darwinismo Cuántico, pues la existencia se basa en la persistencia darwiniana. Es decir, las correlaciones cuánticas en términos de información serían “la fuente de consenso como reconoció Everett” [ib., p.25].

Zurek parece coincidir con Bohr en el concepto de objetividad como intersubjetividad apoyada en la inambigüedad del lenguaje. Para Zurek las medidas objetivas son un producto del Darwinismo Cuántico pero, a diferencia de Bohr, en este mecanismo el observador no es exterior a la interacción sistema aparato y no hay un corte de Heisenberg nítido, o sea no hay dualismo ontológico, pues “[...] la cualidad de clásico” es cuestión de grado y de criterio [...] hay muchos estadios intermedios desde lo cuántico a lo clásico”[íd.].

Por otro lado, para Zurek, el estado se define y transforma en objetivo gracias a la información que se obtiene mediante el proceso de Darwinismo Cuántico que “da cuenta de la transición de la fragilidad cuántica (de la información) a la efectiva robustez clásica. El concepto de información es central en la interpretación existencial. No obstante, como veremos en la evaluación de la analogía, el uso impreciso de este término polisémico lastra tanto la interpretación como la plausibilidad de la analogía. Tal vez, esto se debe a que Zurek, al explicar la transición cuántico-clásico, admite implícitamente un monismo teórico-informativo de propiedades y procesos influido por el lema ‘*It from bit*’ [Zurek, 2009, p.9].

Esta peculiar visión filosófica, crea una tensión no resuelta entre los aspectos ónticos y epistémicos de la naturaleza de los estados cuánticos. El problema reside en que Zurek pretende elaborar una interpretación realista pero no asume de manera explícita claros compromisos ontológicos.

Parte IV

EVALUACIÓN DE LA ANALOGÍA

Introducción

Una vez expuestos los distintos aspectos del programa de investigación del Darwinismo Cuántico, es evidente que no ha satisfecho las condiciones para resolver el problema de la medida. El proceso de transición cuántico-clásico no explica la percepción de un sólo resultado definido. En definitiva, debe incorporar algún compromiso más en la interpretación.

Zurek no se posiciona claramente sobre el estatuto ontológico de los estados cuánticos. En cierta manera, parece dejar descansar cualquier problema de interpretación en una relación ciertamente problemática entre información y existencia. Las preguntas que se van a intentar responder en este apartado desean dar cuenta de la plausibilidad de una hipotética analogía entre la evolución darwinista y la función que dicha analogía podría desempeñar en la interpretación existencial. Como veremos, el posible papel que juega la analogía en la explicación científica goza de una larga tradición.

La naturaleza de la analogía y sus diversas funciones en el razonamiento han sido fruto de reflexión desde los albores del pensamiento filosófico y científico. En efecto, se puede constatar su uso en la modelización, en la enseñanza, la divulgación, la explicación y la comprensión científica. Se emplea de manera generalizada cuando se trata de explorar científicamente campos todavía desconocidos. Este papel heurístico se concreta como estrategia común en los denominados contextos de descubrimiento²⁶³. En lo que se refiere al establecimiento y desarrollo de la mecánica cuántica, pueden servir de ejemplo, entre otros, los primeros modelos atómicos contruidos por analogía al modelo planetario (Rutherford, 1911 ; Bohr, 1913) o el estudio de los modos de excitación energética del núcleo atómico establecido por analogía a los efectos de las perturbaciones de una gota líquida (von Weizsäcker, 1935). Ahora bien, lo que algunos académicos ponen en duda es la competencia de la analogía para desarrollar una función relevante en la explicación y justificación de las teorías científicas²⁶⁴. Contra el escepticismo de la capacidad justificativa y explicativa de las analogías, se opone la aquiescencia de su uso por parte de la comunidad de científicos que es admitida generalmente por la comunidad académica no siempre sin reservas. Por ejemplo, como refleja Galileo *Sidereus Nuncius* [1610], los puntos iluminados en las zonas

²⁶³No es necesario admitir que exista una separación nítida entre los contextos de descubrimiento y los de justificación.

²⁶⁴Ver, por ejemplo, la respuesta negativa de Giere [1984, pp. 79-80].

oscuras a lo largo del terminator sobre la superficie lunar son análogos a la iluminación solar sobre las cumbres de las montañas de la Tierra al anochecer, lo que junto a otras razones, justifica no creer en la división aristotélica entre el mundo celeste y el terrestre. De la misma manera, James Clerk Maxwell, afirmó la capacidad del “método analógico” para ampliar las consecuencias físicas producto de las analogías matemáticas y también para la comprensión de los fenómenos ya que “para obtener ideas físicas sin adoptar una teoría física, debemos familiarizarnos con la existencia de analogías físicas. Por analogía física me refiero a la similitud parcial entre las leyes de una ciencia y las de otra que hace que cada una de ellas ilustre la otra. Así, todas las ciencias matemáticas se basan en las relaciones entre las leyes físicas y las leyes de los números, de modo que el objetivo de la ciencia exacta es reducir los problemas de la naturaleza a la determinación de cantidades mediante operaciones con números.” [Maxwell, J.C., 1965, vol.I, p.156]. Siguiendo estos ejemplos, se comprende inmediatamente que la analogía haya sido objeto de un copioso análisis por parte de la filosofía de la ciencia²⁶⁵.

Tradicionalmente se inicia la presentación del debate en torno al valor de analogía dentro de la formulación de teorías en las controversias surgidas a principios del siglo pasado. El físico de orientación instrumentalista Pierre Duhem consideró que, salvo por su valor heurístico, los modelos analógicos físicos, a diferencia de las analogías matemáticas, eran prescindibles para la explicación científica²⁶⁶.

En contraposición a estas ideas, Norman Robert Campbell pensaba que, para que una teoría mostrara poder explicativo, no bastaba con la formulación de un conjunto de leyes y de un diccionario que las relacionara con las magnitudes experimentales. Para el físico británico era necesario que tanto las teorías físicas como las matemáticas completaran su estructura lógico formal mediante una analogía con leyes ampliamente conocidas y firmemente establecidas. La postura de Campbell sobre la función explicativa de la analogía dentro de una teoría fueron contestadas ampliamente por Carl Hempel, quien afirmó la inoperancia de las analogías en la explicación científica, a pesar de reconocer su valor como método para guiar las investigaciones²⁶⁷.

²⁶⁵Esta larga historia del análisis de la analogía en el marco de la epistemología tiene como precedente a Aristóteles, J.S. Mill, etc. y, como se ha visto en la primera parte de este trabajo, presenta una relevancia manifiesta para el presente trabajo en las filosofías de la ciencia de John Herschel y William Whewell.

²⁶⁶Como es bien conocido, para Duhem las teorías están formadas por un conjunto de leyes deducidas de hipótesis y constituidas por relaciones entre términos teóricos que se pueden asociar a magnitudes experimentales. Las teorías no explican los fenómenos en el sentido de ponerlos en relación con la realidad. Simplemente tienen un valor puramente representativo.

²⁶⁷Sin entrar en detalles, baste señalar una de las críticas en las que se apoyó Hempel: bajo el punto de vista de Campbell, no parecía necesario, o no se requería, explicación de fenómenos intuitivos o ampliamente conocidos. Evidentemente, éste no puede ser el caso. Además, contra la opinión de que la explicación debe funcionar como una reducción a sucesos familiares, Hempel argumentaba que ciertos fenómenos conocidos pueden incluso reducirse a principios nada intuitivos como sucede en las explicaciones basadas en la teoría de la relatividad o la mecánica cuántica [Hempel, 1976, pp.124-125]. Así pues, para Hempel las analogías no añaden poder explicativo a las teorías puesto que no son necesarias en la deducción de las leyes experimentales. Aunque se disponga de ellas, no participan de la función representativa o poder unificador.

El concepto poliédrico de analogía se puede abordar desde diversas disciplinas como la lógica, la psicología cognitiva, la teoría de la ciencia, etc. Para situar el marco sobre el que se desarrollará esta investigación parece conveniente comenzar exponiendo algunas cuestiones fundamentales del análisis lógico referente a la argumentación analógica (7.1).

En la sección (7.2), se presenta la estructura de los argumentos analógicos bajo un aspecto discursivo y se clarifican los conceptos de analogía positiva, negativa y neutra. Para evaluar la plausibilidad de una inferencia analógica, es conveniente diferenciar entre analogía material o preteórica y analogía formal. Así mismo, la presentación del argumento en un esquema bidimensional facilita la evaluación. Se deben diferenciar las relaciones dentro de cada dominio -relaciones verticales - de las semejanzas entre propiedades o entre sus estructuras de los dos dominios -relaciones horizontales (7.3).

Entre las posibles herramientas de análisis, seleccionamos el modelo de articulación de Bartha (7.4) porque incorpora y refina los modelos clásicos. Entre los distintos tipos de argumentos analógicos, el Darwinismo Cuántico se puede clasificar como explicativo abductivo probabilístico.

Con los medios teóricos de análisis a nuestro alcance, procedemos a estudiar la analogía del Darwinismo Cuántico en (8). Comenzamos clarificando los posibles objetivos de la analogía (8.1) y fijando la metodología que se empleará en la evaluación (8.2). Los tres ámbitos de nuestro análisis cubren el uso metafórico (8.3), la analogía formal (8.4) y la analogía matemática (8.6).

Capítulo 7

El razonamiento analógico

7.1. La perspectiva lógica

Desde un punto de vista lógico, el argumento analógico²⁶⁸ se constituye mediante una relación de analogía entre las premisas y la conclusión. Por lo tanto, requiere de una relación entre al menos dos términos: la fuente o foro (F), que es el argumento más familiar o mejor conocido dentro de un dominio, y el objetivo o tema (T), perteneciente a otro campo, al que se desea extender el conocimiento y fundamentar su plausibilidad. La asimetría derivada de la diferencias entre ambos dominios, el del foro y el del tema, pueden establecerse desde el punto de vista tanto semántico como pragmático²⁶⁹. La bondad o plausibilidad de la inferencia depende fuertemente de la adecuación y buen ajuste de la relación analógica.

Uno de los debates importantes abiertos sobre el argumento analógico es su relación con otros tipos de argumentos. La corriente académica más extendida defiende la irreductibilidad del argumento analógico a los argumentos deductivos o inductivos²⁷⁰. El argumento principal esgrimido es que una cosa es poder expresar un argumento de otro modo, por ejemplo un argumento inductivo de forma deductiva, y otra bien distinta, es tenerlo que reformular deductivamente para que sea válido²⁷¹. De igual manera,

²⁶⁸En lo que sigue y con la ayuda de Juthe [2005], analizaremos las relaciones entre las formas de argumentación y la relación entre la semejanza y la analogía.

²⁶⁹Esta estructura argumental propia de los argumentos analógicos, como relación entre argumentos circunscritos a sus campos de aplicación, es lo que algunos autores describen como metaargumentos [Marraud, 2013, p. 200].

²⁷⁰Para consultar bibliografía, Juthe [2005, p.17].

²⁷¹Por ejemplo, sea el siguiente argumento inductivo con dos premisas y una conclusión: (1) los pumas, las vacas, ..., los seres humanos son mamíferos, (2) los pumas, las vacas,..., los seres humanos tienen vértebras. Por lo tanto, concluimos que (3) todos los mamíferos tienen vértebras. Este argumento se puede reformular de manera deductiva: (1) los pumas, las vacas,..., los seres humanos son mamíferos, (2) si los pumas, las vacas,..., los seres humanos (todos los observados) tienen vértebras, entonces probablemente todos los mamíferos tienen vértebras. (3) Los pumas, las vacas,..., los seres humanos son mamíferos. Entonces todos los mamíferos probablemente tienen vértebras. El carácter inductivo de esta formulación deductiva se incorpora mediante la alusión al condicional con la probabilidad: “si ..., entonces probablemente ...”. Por tanto, la validez del argumento deductivo depende de esa incorporación. Para que se considere que el argumento inductivo sea reducido al

aunque los argumentos analógicos se pudieran formular en forma deductiva o inductiva, si es necesario incluir en la exposición una relación de analogía, no parece sostenible la posición reduccionista. No obstante, es común en la literatura encontrar al razonamiento analógico clasificado como un tipo de inferencia inductiva en el sentido de que amplían el conocimiento en situaciones de incertidumbre [Holland et al. 1986: 1 apud. Bartha]²⁷².

Siguiendo con la perspectiva lógica, los argumentos por analogía se clasifican en un subconjunto de los argumentos por semejanza, que podrían ser de varios tipos: los argumentos por similitud de propiedades, por similitud de relaciones (analogías), etc.

En efecto, en teoría de la argumentación, se considera al argumento analógico no tanto como una relación de similitud sino más bien como una semejanza de relación entre los elementos de la fuente y los del objetivo que se comparan. La correspondencia significa que los elementos de F y de T comparten las mismas relaciones uno a uno. Por lo tanto, el núcleo formal de un argumento por analogía convierte a éste en una forma válida de razonamiento bajo la premisa tácita de la existencia de un isomorfismo de estructuras modelado por los análogos.

No obstante, se debe notar que, en los casos de argumentación analógica en marcos no puramente formales como los de las ciencias empíricas, la condición de isomorfismo se ve relajada a la elección de un subgrupo de elementos significativos, tanto semejantes como diferentes, correspondientes a la fuente F y al tema T. Abundando en este punto, cuando no se evidencia de forma explícita el citado isomorfismo de estructuras, se suele mantener como premisa implícita sobre la que opera la analogía.

Como en la mayor parte de los argumentos por analogía en el campo de las ciencias experimentales, si alguna de las premisas de la fuente no encuentra correlato en el tema - esto es, se quiebra el isomorfismo. Para relajar esta estricta condición, hay autores que proponen la creación de modelos análogos virtuales lo más próximos al objetivo o tema, que sirvan para evaluar las perturbaciones debidas a esas variables. Esta estrategia es, sin duda, una causa potencial del fracaso del argumento analógico²⁷³.

Una de las características importantes del argumento por analogía es su dependencia del contexto. En este sentido, se diferencia entre aquellas analogías en las que son iguales las relaciones entre elementos en el mismo campo de objetos distintos (analogías del mismo dominio), de aquellas relaciones iguales entre elementos, que pertenecen a campos distintos, de diferentes objetos (analogías de dominios diferentes). Ésta es una manera de diferenciar el argumento analógico del argumento de casos ejemplares.

También es relevante apreciar que, gracias a la dependencia del contexto, se dispone de un criterio para discriminar las metáforas de las analogías: si la analogía se establece entre elementos pertenecientes a campos muy apartados, entonces se puede considerar que la relación se aproxima a lo que entendemos por una metáfora o parábola [Juthe,

deductivo no debe contener encubierta una inducción.

²⁷²Esto incluiría el argumento abductivo.

²⁷³Por ejemplo Weitzenfeld [1984, pp. 137-149].

op.cit. p. 5]. Con otras palabras, como en la literatura científica no se suele explícitamente diferenciar la analogía de la metáfora, la contextualización de las analogías y la concreción de la confrontación entre la fuente F y el objetivo T nos facilitan una posible discriminación: si las comparaciones son concretas y pertenecen a dominios bien acotados hablaremos de analogía y, por el contrario, si no están claros los elementos u objetos de la comparación y en el argumento se trascienden los campos de aplicación de F y T entonces estaremos ante una metáfora²⁷⁴.

Sin duda la relación entre la analogía y la metáfora es un tanto difusa, pero estamos de acuerdo con Andrés Rivadulla en que “ la analogía es ciertamente fundamental para la construcción de metáforas. Pero evidentemente, no todo lo que se basa en una analogía es una metáfora” [2006, pp. 198-199].

Varias son las consecuencias derivadas de la relación analógica entre la fuente (F) y el objetivo (T): (1) en la analogía no son importantes el número de propiedades compartidas por F y T, sino que existan relaciones en F y sus contrapartidas en T; (2) la analogía es relativa y dependiente de la asignación de predicados condicionados por los contextos o el nivel de abstracción, así por ejemplo, una relación puede conducir a que el predicado asignado desde F a T confiera, en un caso, la característica de analogía y en otro no; (3) si se asumen la posición extrema de isomorfía completa de estructuras, las analogías pueden ser completas o incompletas dependiendo de si las relaciones se dan entre todos los elementos o sólo entre una parte de ellos; (4) esta última característica dejaría en principio fuera el concepto de relevancia.

Por último, parece apropiado concluir de la consecuencia (2) el carácter pragmático del argumento analógico pues la elección de los puntos de relevancia dependería también de los usos e intenciones de los agentes en su contexto histórico. Esto es aún más evidente en el caso de que no se cumpla de manera estricta el isomorfismo entre las relaciones de F y T.

7.2. Estructura del argumento analógico

Es conviene analizar la estructura del argumento analógico bajo un contexto discursivo en el que pueda presentarse un cambio de conocimiento para un agente. La inferencia analógica así entendida toma como elementos las creencias o las suposiciones de dichos agentes que es posible verter en proposiciones y, por lo tanto, estamos ante una inferencia de tipo epistémico o metodológico. Es tradicional presentar esta inferencia mediante un esquema bidimensional en forma de tabla que sirve para desarrollar el análisis conceptual. Según Bartha [2010, p.13], la forma del argumento analógico es la siguiente:

²⁷⁴En este sentido, como se verá en el apartado de evaluación, se puede decir, por ejemplo, que la relación entre la selección natural y la selección artificial es una analogía mientras que el concepto de información genética es metafórico.

1. F es semejante a T
2. F muestra una característica H
3. Conclusión, T tiene una característica H o una semejante H*

De manera aún más concreta: sea F el dominio fuente y T el dominio objetivo, donde se entiende que el dominio es un conjunto de objetos (a), propiedades (P), relaciones (R) y funciones (f) junto con una interpretación, esto es, aquellas sentencias aceptadas sobre ellos. Para facilitar el análisis que sigue, se entiende que los elementos del dominio se pueden representar mediante proposiciones. La analogía es una aplicación o correspondencia φ (“mapping”) entre los objetos o las propiedades o las relaciones o las funciones de la fuente F y las correspondientes al objetivo T. Es decir, $\varphi(a; P; R; f) \rightarrow (a^*; P^*; R^*; f^*)$. Esta correspondencia no requiere restricciones tales como la inyectividad, la sobreyectividad o la suprayectividad [íd].

Según la categorización introducida por Keynes en su tratado de probabilidad [1921, pp. 252-253], la analogía puede ser positiva, negativa y neutra.

-**La analogía positiva**, representada por P, resume una lista de proposiciones P_1, \dots, P_n del dominio fuente F que se acepta corresponden a unas proposiciones semejantes en el objetivo T, representadas de forma resumida por P^* .

-**La analogía negativa**, representada por A, resume una lista de proposiciones A_1, \dots, A_n del dominio F, y por B^* , resume una lista de proposiciones del dominio T, de tal manera que no se mantienen las proposiciones análogas correspondientes A^* y B. Es decir, A corresponde a $\neg A^*$ y B^* a $\neg B$.

-**La analogía neutra** viene representada mediante las proposiciones del dominio F para las que no se conoce si las correspondientes en T se mantienen.

-**La analogía hipotética** corresponde a aquellas proposiciones representadas por H en el dominio F, incluidas entre las analogías neutras, de las que se desea establecer la plausibilidad de su mantenimiento en sus correspondientes representadas por H^* .

Fuente (F) \rightarrow Objetivo (T)

$P \rightarrow P^* \rightarrow$ (analogía positiva)

$A \rightarrow \neg A^* \rightarrow$ (analogía negativa)

$\neg B \rightarrow B^* \rightarrow$ (analogía negativa)

$H \rightarrow H^* \rightarrow$ (plausibilidad de la analogía hipotética)

El argumento analógico se puede explicitar de la forma siguiente: es plausible, es decir tiene soporte o justificación suficiente, que las proposiciones H^* del dominio objetivo o tema T correspondientes a sus análogas H en el dominio fuente F se mantengan, teniendo en cuenta las analogías positivas encontradas entre los dos dominios y aceptando la existencia de diferencias representadas por las analogías negativas [Bartha, 2010, p.15].

7.3. Evaluación de la plausibilidad de las analogías

Un primer examen sobre la plausibilidad de los argumentos analógicos se encuentra en Aristóteles²⁷⁵. El Estagirita entiende la plausibilidad como capacidad persuasiva (*pithanon*) y la evalúa conforme a ciertos criterios como la dependencia del número de similitudes entre los atributos - propiedades y relaciones- compartidos por la fuente y el objetivo. Estas condiciones forman parte de una extensa lista de propiedades que al sentido común le indican la bondad de la analogía. Aristóteles defiende que: (1) la plausibilidad es más débil si existen muchas diferencias entre los atributos de la fuente y el objetivo o si éstos son poco conocidos; por el contrario, (2) la plausibilidad de la analogía se ve reforzada cuando los análogos entre la fuente y el objetivo son de tipo estructural o causal. También es favorable al establecimiento de la analogía (3) cuando existe un grado alto de relevancia de las similitudes o (4) si muchas analogías apuntan hacia la misma conclusión [Bartha, op.cit.,19].

Teniendo presente la estructura del argumento analógico y los conceptos antes apuntados, Hesse [1966, pp. 57-100] refina el análisis aristotélico aplicándolo al marco de las teorías científicas. Clasifica las analogías en dos tipos de relaciones diádicas denominadas respectivamente horizontales y verticales. Las primeras pueden caracterizarse por (1) establecer identidad y diferencia de propiedades o, con más generalidad, (2) ciertas semejanzas observables entre los correspondientes dominios a comparar. Así, por ejemplo, la esfericidad entre los planetas es muestra de la identidad de propiedades y la característica de reflejarse en las ondas, sean estas mecánicas o electromagnéticas, es ejemplo de la similitud. También pueden mostrar (3) similitud estructural o funcional, como en el caso de la morfología entre aves y mamíferos. Por último, (4) puede existir simplemente una semejanza de relaciones entre los términos de la fuente y los del objetivo. Es decir, no es necesaria una relación horizontal entre hechos, propiedades, etc., de los dos ámbitos. Por ejemplo, la relación entre la iglesia y sus feligreses es análoga a las relaciones paterno filiales.

Las relaciones de verticalidad entre los términos de la fuente - o del objetivo- pueden ser de tipo causal, - como en (1), (2) y (3) -, de relación de todo a parte - como en (3) - o abstracta -como en (4), donde no hay relación horizontal de similaridad entre términos salvo porque existe una semejanza de relación entre F y T, aunque a veces esta relación pueda también ser causal [ib., 59].

A la relación de horizontalidad que se puede establecer en virtud exclusiva de la relación de verticalidad entre los elementos del sistema fuente y los del objetivo, Hesse la denomina analogía formal. Esta semejanza de relaciones o estructuras entre la fuente y el objetivo es formal en el sentido de que esencialmente son “interpretaciones de la misma teoría formal” [ib., 68] y, por lo tanto, se llega a ellas una vez establecidas las teorías²⁷⁶. Con otras palabras,

²⁷⁵Aristóteles distingue entre argumentos analógicos de naturaleza inductiva sustentados mediante ejemplos que concluyen en una deducción (*paradeigma*) y argumentos apoyados en el concepto de similitud de atributos compartidos (*homoiotes*).

²⁷⁶La analogía entre el flujo de calor y el flujo de campo eléctrico constituiría un ejemplo histórico al respecto.

las redes de relaciones verticales - sean o no causales- de la teoría en F corresponden a las relaciones verticales en la teoría T.

Así mismo, a las semejanzas horizontales desveladas entre los dominios antes de formalizarse una teoría y que, por lo tanto, son independientes de las relaciones abstractas estructurales, Hesse las denomina analogías materiales o preteóricas. El requerimiento fundamental para las analogías preteóricas o materiales es que sus elementos, esto es, las propiedades o relaciones causales, deben ser observables. La similaridad entre propiedades debe poder reducirse a la dicotomía identidad- diferencia.

Para Hesse, la plausibilidad de un argumento analógico procedente de analogías funcionales o relacionales depende en gran medida de que las relaciones estructurales que se encuentran en el dominio fuente, y se desean proyectar en otras pertenecientes al dominio objetivo, no sean meras correlaciones sino verdaderas relaciones causales [ib., 85]. Por otro lado, las relaciones de verticalidad pueden establecerse con independencia de la existencia de relaciones de semejanza de propiedades entre los objetos de los sistemas bajo comparación. Por ejemplo, en la relación entre padres e hijos no se mantienen propiedades similares que correspondan a la relación análoga entre la iglesia y los feligreses [ib., 62].

Si se desea conseguir “el uso predictivo de los modelos científicos” [ib.,100], la aceptabilidad de un argumento analógico para Hesse requiere tanto de la analogía material como de la analogía formal. Además, para que sea aceptable la plausibilidad de un argumento analógico no sólo es necesaria la existencia de las citadas analogías sino que, como se ha advertido, también se precisa de una relación causal entre la analogía hipotética y la analogía positiva o que por lo menos no se conozca su imposibilidad [ib., 87]. Por último, Hesse también impone para la aceptabilidad del argumento analógico que las propiedades esenciales y las relaciones causales del dominio fuente F no formen parte de la analogía negativa. Es decir, su negaciones no pueden formar parte del tema u objetivo T.

De manera más general, Hesse piensa que los científicos comienzan por encontrar similitudes observacionales entre una fuente y el tema para, progresivamente y de acuerdo con el acopio de conocimiento sobre ambos sistemas, encontrar relaciones estructurales que lleven al establecimiento de isomorfismos entre los dos dominios. Ésta es la manera en la que se consigue formular nuevas leyes sobre el dominio desconocido. De ahí se sigue que las analogías preteóricas puedan desembocar en la conveniencia de postular entidades teóricas para el dominio objetivo y, eventualmente, desvelen relaciones de causalidad ocultas.

7.4. El modelo articulado de Paul Bartha

Paul Bartha [2010] suscribe la distinción que Mary Hesse establece entre analogía formal y material para proponer un nuevo modelo de evaluación de los argumentos analógicos basado principalmente en las condiciones que hacen posible que las relaciones verticales de la fuente puedan extenderse al objetivo.

En efecto, en el modelo de Bartha prima el carácter formal frente al material. Esto se

debe a que, en contra de lo propuesto por Hesse, la práctica científica muestra que a veces el proceso de establecimiento de nuevas leyes en dominios desconocidos no parte de las analogías materiales. Por ejemplo, si el punto de partida son las analogías formales, como es el caso de las relaciones matemáticas, entonces no es necesariamente prioritaria la analogía material. Además, como ejemplifica el caso que examinaremos en este trabajo, a veces se tiene un conocimiento importante y exhaustivo del dominio objetivo aunque se pretendan explicar ciertas cuestiones de fundamento. También, en contra de lo que Hesse sostiene, las analogías matemáticas y las correlaciones estadísticas demuestran que, para evaluar la plausibilidad de un argumento analógico, no es necesaria la existencia de una relación causal entre la analogía hipotética y la analogía positiva.

Por último, Bartha discute la vaguedad con la que Hesse afronta la forma de establecer qué propiedades y relaciones causales son esenciales para evaluar la bondad de la analogía y critica la condición establecida por Hesse de que dichas propiedades y relaciones no pertenezcan a la analogía negativa. Cree que los problemas que subyacen a este requerimiento se derivan de no considerar que para establecer las propiedades y las relaciones causales relevantes debe tenerse en cuenta el contexto.

Bartha distingue dos concepciones de plausibilidad: la probabilística, identificada con el grado de creencia racional y subjetiva de los agentes y la modal que se centra en los fundamentos esenciales para tomar la analogía de forma seria. Concretando aún más, su modelo de evaluación de argumentos analógicos se estructura en torno a dos ejes principales interconectados: el primero se refiere a la plausibilidad para extender la relación vertical de la fuente al objetivo y el segundo se relaciona con la aplicación de dichos principios de forma contextual para generar una taxonomía basada en los diferentes tipos de argumentos analógicos.

En lo que se refiere al primer eje, la plausibilidad para extender la relación vertical de la fuente al objetivo, depende de dos principios:

1. **El principio de asociación previa** estipula que “la descripción del dominio fuente debe incluir una relación vertical explícitamente establecida que el argumento analógico se supone extiende de alguna manera al dominio objetivo” [Bartha, op.cit, p.25]. Esta relación puede ser de tipo lógico, explicativo, causal o mostrar una correlación²⁷⁷.
2. **El principio de potencial de generalización** afirma que “un buen argumento analógico es aquel en el que, como mínimo, no existe una razón convincente para negar que la asociación previa, que se obtiene en el dominio de origen, se pueda generalizar de una manera tal que sea posible extenderla al dominio objetivo” [í.d.]

²⁷⁷Como vemos, basándose principalmente en las similitudes y diferencias de las relaciones de verticalidad entre la fuente y el objetivo Bartha relaja la condición necesaria de causalidad del modelo de Hesse. Propone que las relaciones esenciales, establecidas según el contexto, reflejen una “tendencia a concurrencia”.

La **condición mínima** que se exige para evaluar positivamente la plausibilidad de un argumento analógico es que “las características que desempeñan un papel central en la asociación previa deben tener análogos en el dominio objetivo, o por lo menos no se conozca que no se mantienen” [ib., 26].

Así pues, procedente de la relación de verticalidad, se establecerá un modelo de asociación previa que servirá como mediador en la evaluación de cualquier argumento analógico. Este modelo depende del tipo de relación de verticalidad para que pueda extenderse de forma plausible del dominio fuente (P, H) al dominio objetivo (P^*, H^*).

Con relación al segundo eje, Bartha [ib., 98] clasifica los distintos tipos argumentales dependiendo de la dirección en la que se muestra la asociación previa (relación vertical) y de si el modo en que se establece es inductivo o deductivo. En este último caso, estos dos modos reflejan claramente los dos tipos principales de reglas de inferencia sugeridas al agrupar las condiciones de plausibilidad del modelo evaluativo del sentido común antes aludido: una basada en estructuras que conducen a la conclusión mediante deducción y otra derivada de supuestos inductivos.

En lo que respecta a la direccionalidad, las relaciones verticales y los consecuentes argumentos analógicos, pueden clasificarse en:

1. **Argumentos predictivos** ($P \rightarrow H$), la asociación previa es la demostración del teorema matemático que media entre P , propiedad positiva relacionada con un conjunto de condiciones y Q , teorema del dominio fuente. Así, las características similares de P^* conducirán de forma plausible al teorema H^*
2. **Argumentos explicativos** ($H \rightarrow P$), la asociación previa es la explicación que media entre la hipótesis H y sus consecuencias P . Por lo tanto similares consecuencias P^* se explicaran de forma plausible por hipótesis similares H^* .
3. **Argumentos funcionales** ($P \leftrightarrow H$), donde P puede ser causa eficiente y H causa final, las mismas condiciones se extenderán a P^* en relación con H^* .
4. **Argumentos correlativos** son aquellos que muestra una relación simétrica ($P \downarrow H$), es decir, no direccional entre sus términos. Éste es el caso de las correlaciones estadísticas que son plausibles extender al dominio objeto ($P^* \downarrow H^*$).

En lo referente a la modalidad, los argumentos pueden clasificarse en:

1. Asociaciones deductivas, que son compatibles con los argumentos predictivos y explicativos.
2. Asociaciones inductivas, que son compatibles con los cuatro tipos anteriormente citados.

Si aplicamos estas dos constricciones a los modelos de asociación previa se llega a la siguiente tabla de tipos de argumentos analógicos:

MODOS	DIRECCIÓN AP	DIRECCIÓN AP	DIRECCIÓN AP	DIRECCIÓN AP
-	Predictivas ($P \rightarrow H$)	Explicativas ($H \rightarrow P$)	Funcionales ($H \leftrightarrow P$)	Correlativas ($P \# Q$)
DEDUCTIVOS	MATEMÁTICOS	ABDUCTIVOS	-	-
INDUCTIVOS	PREDICTIVO PROB.	ABDUCT. PROB.	FUNCIONALES	CORRELATIVOS

Cuadro 7.1: Tipos de argumentos analógicos del modelo articulado.

El proceso de evaluación de argumentos o juicio de plausibilidad requiere de la “plausibilidad a primera vista”, que es aquella en la que la analogía positiva es relevante en la asociación previa y no se dan factores esenciales relevantes en la analogía negativa. Un ejemplo de plausibilidad a primera vista es el del método de la *vera causa* de John Herschel y William Whewell: la causa es plausible si es una causa verdadera, es decir si puede ser sujeto de confirmación.

Una vez encontrada la plausibilidad a primera vista se puede establecer la plausibilidad cualitativa sobre la base de tres criterios: fuerza de asociación previa, grado de analogía positiva y presencia de múltiples analogías.

El modelo articulado se realiza en tres pasos [ib., 102 y ss.] :

1. Se encuentra o elabora una asociación previa que debe satisfacer ciertas condiciones estandarizadas que dependen del tipo de argumento que se muestra en la tabla. Estas condiciones canónicas dependen de las diferentes aproximaciones filosóficas a la hora de entender la explicación, la causación, etc.
2. Se determina el grado de relevancia de las características explícitas e implícitas del dominio fuente y del objetivo que conducen a satisfacer la conclusión del argumento.

Hay dos tipos de problemas en relación al establecimiento del grado de relevancia de las características explícitas. Se debe tener precaución en no exagerar la analogía positiva y lo mismo sucede en el caso de la analogía negativa. Para lidiar con este problema, se pueden establecer como características críticas todas aquellas que son esenciales en la asociación previa. Para ello, se diferenciarán claramente las características esenciales de las que no lo son.

Para determinar la relevancia de las características implícitas, se examinarán con respecto a un fondo de características explícitas.

3. Por último, se evaluará el potencial de generalización mediante el estudio de los factores positivos y negativos y su grado de solapamiento y diferencias, de tal manera que se pueda establecer un mínimo de plausibilidad. Una de las claves para establecer el potencial de generalización es que se pueda encontrar un patrón común o unificación en las relaciones de verticalidad tanto en el dominio fuente como en el objetivo.

7.4.1. Analogías explicativas abductivas de tipo probabilístico

En lo que respecta a este trabajo, las analogías explicativas abductivas de tipo probabilístico son las relevantes para la evaluación de la plausibilidad del argumento analógico. En este tipo de analogías, H representa la hipótesis de tipo causal que explica con cierta probabilidad algún tipo de fenómeno y, por lo tanto, forma parte del *explanans* de dicho fenómeno. Las analogías positivas pueden tener elementos comunes con el conjunto de los fenómenos observables.

- **La asociación previa** sería del tipo siguiente: el fenómeno observado (E) se debe a las causas (C), bajo las condiciones de contorno y auxiliares (ca), a pesar de las causas en contra (co), donde H está incluida entre las causas (C).
- **Las precondiciones** son dos:
 1. Para cualquier causa que contribuye a la explicación, no se conoce ninguna condición de fracaso que se mantenga en el dominio fuente.
 2. Las hipótesis auxiliares (ca) se deben justificar.
 - **El grado de relevancia:** salvo las causas que contrarrestan la explicación, todos los factores causales en la asociación previa son esenciales y se deben añadir también aquellas consecuencias observables derivadas de ellos, incluido el caso de la hipótesis causal. La analogía se quiebra si alguno de los citados factores pertenece a la analogía negativa.

Así pues, en este tipo de argumentos los factores críticos que deben ser investigados con detalle se pueden dividir en dos grupos: (1) aquellos centrados en los efectos, para los que el alcance de la hipótesis H se relaciona con las consecuencias más probables de H junto a las condiciones adicionales, y (2) los que están relacionados con las causas, como los factores causales que no se encuentran en el dominio fuente y las suposiciones auxiliares (ca), salvo que las podamos colocar en la analogía neutra.

Si tenemos en cuenta estas condiciones, la evaluación de plausibilidad sería la siguiente:

1. Condición de solapamiento: debe existir elementos en el conjunto intersección entre los fenómenos observados (E) y la analogía positiva (P).
2. Diferencias que no sean críticas:
 - a) Los efectos observables de H no deben pertenecer a la analogía negativa. De hecho, alguno de ellos debería pertenecer a la analogía positiva.
 - b) No se debe mantener en el dominio objetivo ninguna condición conocida que arruine o quiebre la asociación previa. En especial ni las causas (C), ni las hipótesis auxiliares (ca) deben pertenecer a la analogía negativa.

Por último, el argumento analógico refuerza su plausibilidad si de la hipótesis explicativa se pueden derivar descripciones precisas de las consecuencias observadas.

Capítulo 8

La analogía del Darwinismo Cuántico

8.1. Objetivos de la analogía

El objetivo de Zurek es resolver el problema de la medida reconciliando las concepciones de Everett y las de Bohr. En su programa interpretativo, la representación de los sistemas físicos, sus interacciones y su evolución temporal son exclusivamente cuánticos. El formalismo de Everett es la clave para la resolución del problema: la transición entre la fragilidad de los estados cuánticos y la robustez de los clásicos. El objetivo de la investigación es analizar el límite entre los dos ámbitos [Zurek, 2003, p.771].

La pregunta que abordamos en esta primera sección refiere a la función que desempeña la analogía con la selección natural en el modelo de Darwinismo Cuántico.

Los orígenes de ésta analogía se enmarcan dentro de una concepción inspirada por la epistemología evolutiva de J.A. Wheeler y su idea del origen darwinista de las leyes de la física [Wheeler, 1998, pp.351]²⁷⁸. De hecho, aunque Zurek siempre fue “muy aficionado a mirar al ‘mundo natural’ en términos Darwinistas, la tendencia fue fuertemente alentada por la influencia de John [...] [por eso] Parecía bastante natural mirar la emergencia de lo clásico como consecuencia de un análogo cuántico de la selección natural”[Zurek, 2004, p. 123].

Así pues, esta analogía parece haber jugado cierto papel heurístico que culminó al acuñar el concepto de “darwinismo cuántico” en el año 2003. De esta manera, podría continuar el programa de decoherencia sobre una pista nueva: los rastros que el sistema deja en el ambiente.

La analogía también muestra un evidente objetivo pedagógico. Por ejemplo, cuando al considerar la transferencia de información al entorno, Zurek afirma que “[...] la consecuencia de una redundancia alta tiene una significación que se puede apreciar mejor invocando analogías con la ‘supervivencia del más apto’.”[ib., p.129].

Además, satisface una finalidad retórica gracias al uso metafórico de expresiones

²⁷⁸Su admiración por Darwin y la analogía con la selección natural, también se puede encontrar en, [Wheeler, 1992, pp.21-23].

comunes en biología, como se puede apreciar en este tipo de explicaciones: “un estado que esparce muchas impresiones de su ‘información genética’ a través del entorno debe sobrevivir tiempo suficiente -tiene que ser resistente a la perturbación causada por el entorno”[ib., 129].

De la misma manera, es frecuente que los conceptos nuevos se construyan sobre metáforas apoyadas en conceptos propios de las teorías evolutivas. Éstas serían submetáforas como “la selección inducida por el entorno (*einselection*) [1982]”, en clara alusión a la lucha por la supervivencia darwiniana ‘ como disputa por los recursos. Estos encontrarían otra metáfora en conceptos como el de memoria útil en el universo [Zurek, 2009, p. 9]. Estaríamos ante una red trabada de submetáforas que pertenecerían y conformarían el mismo dominio del Darwinismo Cuántico.

Sobre estos objetivos - pedagógicos, heurísticos, retóricos, etc.- los conceptos metafóricos no referirían. Tampoco a los enunciados se les podría asignar un valor de verdad [Bustos, 2000, p.135]. Esto no implica que la analogía del Darwinismo Cuántico sea incapaz de introducir una nueva forma de comunicar una serie de conocimientos sobre un campo reciente y poco explorado como es el de la transición cuántico-clásico. Sin duda, esta función la puede desempeñar con cierta solvencia esta analogía, pues los conceptos que utiliza no se pueden reducir a la literalidad y contribuye a la capacidad de comunicación de nuevo conocimiento.

Por último, la inferencia analógica del Darwinismo Cuántico parece también que desea desplegar un objetivo explicativo o demostrativo de la plausibilidad de una hipótesis. El modelo analógico sugiere que el proceso de transición desde lo cuántico a lo clásico se explica de forma análoga o semejante a la evolución de las especies. En esencia, la hipótesis del Darwinismo Cuántico es más plausible gracias a su analogía con la selección natural. Como hemos visto, en términos generales, la función y el valor explicativo de la analogía ha sido rechazada por las orientaciones neopositivistas de la ciencia.

8.2. Nuestro enfoque metodológico

El análisis sobre la plausibilidad de la inferencia analógica se puede establecer mediante dos lenguajes: el material y el formal. En la literatura científica muchas de las analogías se presentan como cuestiones de hecho, cuyas consecuencias se investigan experimentalmente y se analizan mediante modelos de datos y simulaciones. Pero esos datos y modelos se pueden fundamentar tanto en las entidades y sus propiedades - nivel material del lenguaje - como en las teorías que se consideran verdaderas en el dominio de aplicación - nivel formal del lenguaje-. Esto significa que la inferencia material y formal, especialmente en el caso analógico, no son equivalentes aunque lo sean las descripciones de las conclusiones [Suárez, 2019, p.189].

En el modelo articulado de Bartha, se pone énfasis en el análisis formal aunque siempre se tiene presente el dominio o contexto, puesto que impone restricciones a la caracterización

de la analogía. Esto es consecuencia de que no hay un principio universal de similaridad y que, salvo en las analogías matemáticas, el análisis de la inferencia llevado a cabo por Bartha se sustenta, al menos parcialmente, en estructuras inferidas a nivel material. Es decir, el modelo de inferencia de Bartha, a diferencia de otros, se puede considerar metalógico en el sentido de que la identidad de los marcos relacionales establecidos desde el punto de vista lógico no son suficientes para la representación por semejanza de estructuras y su potencial extensión por analogía a teorías que no son puramente formales²⁷⁹.

Así pues, nos parece conveniente que el análisis de la plausibilidad de las inferencias analógicas con carácter explicativo²⁸⁰ del Darwinismo Cuántico se despliegue en la modalidad epistémica pero teniendo en cuenta que la analogía formal se eleva desde el nivel material del lenguaje que soportaría una explicación de tipo óntico.

En efecto, Zurek propone la analogía con la selección natural de Darwin para fortalecer la plausibilidad de una explicación de tipo óntico: la estructura causal inobservable del proceso de transformación de ciertas entidades como los estados cuánticos, que poseen propiedades como fragilidad, no clonabilidad, etc., a otro tipos de entidades, los estados clásicos, que muestran otro tipo de propiedades - robustez, clonabilidad, etc. - es análoga a la estructura causal del proceso de evolución darwiniana. O sea, se supone una semejanza de relaciones entre las dos explicaciones ónticas. Éste es el tipo de inferencia analógica explicativa que utilizó Darwin apoyado en la selección artificial: extrapolar la estructura causal de la selección artificial al mundo natural. No obstante, en el caso del Darwinismo Cuántico, no se puede establecer una analogía material o preteórica como la entendía Hesse puesto que el proceso de decoherencia no es accesible directamente a la observación. Sólo se puede inferir mediante modelos numéricos que traducen la deslocalización de las fases y la caída de las interferencias en términos estadísticos.

Teniendo en cuenta el plano material, Zurek construye una explicación de tipo epistémico: las proposiciones del *explanandum* referentes a la transición cuántico clásico, se deducen lógicamente de las del *explanans*, al igual que las proposiciones del *explanandum* análogo, transformación del rasgo medio de los individuos de una población, lo hacen del *explanans* de la evolución darwinista.

En definitiva, el estudio que abordaremos en las siguientes secciones comienza situando el concepto de Darwinismo Cuántico enmarcado en la distinción entre metáfora y analogía. Tras esta presentación, la segunda parte de nuestro análisis de la plausibilidad de la inferencia analógica del Darwinismo Cuántico sigue el modelo articulación, pero se tendrá en cuenta que la inferencia formal apoya su estructura o asciende semánticamente desde el nivel material [Quine, 2001, sec.59].

²⁷⁹No es necesario profundizar en los problemas que suscita la representación científica en términos de similaridad e isomorfismo, para más información consultar Suárez [2003].

²⁸⁰Siguiendo a Suarez [ib., 192 y ss.] clasificamos las teorías de la explicación científica en dos grupos principales: (1) teorías ónticas, como los modelos causales de Salmon y de Dowe, contrafactual de Woodward [2003], etc., y teorías epistémicas, como las de cobertura legal inferencial [Hempel y Oppenheim, 1948], unificación Michael Friedman [1974], etc.

La tercera parte del análisis estará centrada en dilucidar si existe una relación de tipo nómico análoga entre el Darwinismo Cuántico y la evolución darwinista. Ciertamente, como veremos, el establecimiento de un isomorfismo sintáctico entre las ecuaciones de evolución de los sistemas cuánticos y el cambio de los rasgos medios de las poblaciones es una condición demasiado fuerte. Entre otros motivos, porque no parecen existir leyes de la evolución sino esquemas evolutivos como el representado por la ecuación de Price.

No obstante, siguiendo la estrategia de Dardashsti²⁸¹ [2016], se podría plantear una analogía de simulación, menos exigente que las estrictas condiciones nómicas, en la que simplemente se comparan dos marcos de modelización matemática. Los conceptos compartirían el formalismo matemático común de la teoría de la información. Con este estudio concluiremos nuestro análisis.

8.3. El Darwinismo cuántico como metáfora

Tras sacar a la luz algunos objetivos de esta analogía, un primer análisis parece revelar el carácter metafórico del término “darwinismo”. Así se deduce de su transposición desde el ámbito biológico al dominio de la física.

En efecto, como se advertía en el apartado dedicado a la perspectiva lógica del argumento analógico (7.1), una gran diferencia entre los contextos de la fuente - el proceso de selección natural en el mundo biológico - y del tema - el proceso físico que explica la transición entre el mundo cuántico y la experiencia clásica - puede servir de criterio para distinguir las analogías de las metáforas.

Tanto en el dominio de la física como en de la biología evolutiva, las operaciones son cerradas e independientes. Esto significa que los términos de la biología evolutiva y los resultados de aplicar relaciones entre ellos dentro de su ámbito no tienen resultado términos o relaciones propios de la mecánica cuántica²⁸² [García, 2000, p.226].

Ahora bien, hay varias maneras de abordar el estudio de la metáfora que desbordan el plano lógico. En este sentido, las metáforas no serían verdaderas ni falsas. En efecto, siguiendo el planteamiento clásico de Black²⁸³ [1966, pp.39-40], la metáfora es un medio para describir el mundo bajo cierta perspectiva. De ahí que una metáfora como la del Darwinismo Cuántico podría mostrar otros valores epistémicos, e.g. ser más o menos relevante, completa, ajustada, fiel, etc. Lo importante es que cumpla alguna función, como podría ser la ordenación de un nuevo campo de la experiencia.

Bajo este punto de vista se podría decir que la expresión Darwinismo reemplaza

²⁸¹Agradezco a Rudin Dardashsti que compartiera conmigo esta idea en los encuentros sobre filosofía de la física que tuvieron lugar en Sieg durante el verano de 2015.

²⁸²Desde el punto de vista material, esto significa que los organismos son los términos de la biología y que el conjunto de operaciones o relaciones dentro de la biología evolutiva no tiene como resultado gluones, etc.

²⁸³Seguimos también de manera circunstancial la introducción a este tema en [Bustos, 2000, cap. VI].

conceptos como el de *spam*²⁸⁴ o como el de “redundancia”²⁸⁵.

En esencia, se podría considerar que el término “darwinismo” ocupa un vacío semántico en la teoría de la comunicación y, por lo tanto, estaríamos ante el uso de una palabra con un sentido diferente. No obstante, no creemos que de las palabras de Zurek se pueda inferir que desea utilizar otro sentido para la palabra Darwinismo.

Ahora bien, desde una posición realista, el Darwinismo Cuántico podría tener la función de organización y definición de un nuevo campo de estudio, a saber, la transición cuántico-clásico.

Creemos que en este sentido si se puede considerar a esta metáfora como una *catacresis*, ya que la investigación sobre “el corte de Heisenberg” estaba fuera del acceso empírico. De hecho sigue siendo inaccesible de manera directa y requiere de la mediación de modelos de inferencia estadística.

El Darwinismo Cuántico sería una metáfora que despliega una posible estructura causal de este campo de estudio. Un concepto científico que Boyd denominaría de “clases arracimadas homeoestáticas” [Bustos, 2000, 149]. Constituiría un intento de fijar una referencia no definitoria de manera hipotética: la estructura de relaciones posibles que median entre el mundo cuántico a la experiencia clásica. Los conceptos como “replicación”, “clonación”, “evolución”, “herencia” aparecerían interrelacionados en una estructura causal. De esta manera los teóricos de los fundamentos se podrían referir al fenómeno de la caída progresiva de las interferencias y a la emergencia del comportamiento clásico. En definitiva, el Darwinismo Cuántico sería una metáfora diseñada para explorar un nuevo ámbito de investigación y estaría constreñida su aplicación por el mundo que pretende representar. Por eso, según prospere la investigación, esta metáfora podría ganar en precisión sobre su referencia y someterse a revisión y clarificación tanto de los conceptos como de los dominios fuente y objetivo sobre los que se levanta.

Este análisis de la metáfora podría completarse mediante una orientación comparativa e interactiva. Con respecto a la primera, el concepto de Darwinismo sufriría una transformación de significado a un plano abstracto general y esa función transformadora implícita sería la semejanza de relaciones o analogía.

De la misma forma, bajo un enfoque interactivo la relación dinámica entre el marco de aplicación de la analogía y los términos produciría una ampliación o cambio de significado. De esta suerte, el concepto “darwinismo”, entendido de forma literal, viene acompañado de una serie de significados incorporados que lo delimitan. En este caso, los tópicos serían lucha, reproducción diferencial, etc. Si seguimos el planteamiento de Black [p.54-55], el conjunto de tópicos del Darwinsimo serviría para filtrar, acentuar y organizar un cierto tipo

²⁸⁴ Charles Bennett sugirió a Zurek este término en su conferencia “The quantum origins of classical information and the birth and death of complexity” que tuvo en la Universidad de Waterloo el 20 de mayo de 2013 y que Zurek incorporó en [2014].

²⁸⁵ No obstante, estos conceptos no se adaptan literalmente al significado de “correlación selectiva y masiva de datos entre el sistema y el observador”. En el primer caso, la “sobreprducción de datos” está mediada por un proceso muy concreto y, en el segundo, la redundancia no incorpora la correlación con el observador.

de relaciones - operaciones de computación - en un campo distinto: la mecánica cuántica.

En lo que a esta metáfora respecta, Zurek muestra una intención evidente de elevarla a un plano abstracto y, a la vez, proyectar algunos rasgos propios del darwinismo al proceso cuántico que sirve de filtro para destilar la experiencia clásica.

El nivel de abstracción parece descansar de manera implícita o explícita en otra metáfora, que sirve de marco común sobre el que comparar la semejanza de relaciones entre los dos procesos, uno en el contexto biológico y otro en el físico. En efecto, como hemos visto en la interpretación existencial, el concepto de información parece disolver la diferencia entre los dos dominios y permite establecer la analogía.

En este sentido, el programa de investigación sobre fundamentos y aplicaciones de la mecánica cuántica surge del trabajo seminal de Everett y Wheeler durante los años cincuenta y se construye sobre el paradigma de la información: la física se describe como proceso de almacenamiento, computación y transferencia de información. Aún más, la propia realidad subyacente es informacional [Wheeler, 1990].

Una posición próxima a este compromiso con el “informacionismo” se puede encontrar también en el ámbito de la biología asociado al denominado darwinismo del gen. Como reconoce Daniel Dennett, la selección natural es un conjunto de algoritmos y la evolución de la vida en la Tierra no es más que un proceso algorítmico en el que “Las ideas de Darwin sobre el poder de la selección natural pueden ser también separadas de su base biológica” [1995, p. 58].

Como parece deducirse de estos comentarios, consecuencia de las teorías de la comunicación e información y de las tecnologías de la computación ²⁸⁶, el término “información” se revelaría como una metáfora con un objetivo claro de conseguir una reducción ontoepistémica. Junto al proceso computacional, se constituiría en método y lenguaje unificado aplicable a cualquier ámbito de la ciencia y, en general, de la naturaleza.

8.4. Analogía formal

Zurek expone sucintamente su manera de entender el darwinismo en la siguiente cita:

“¿Cuánto de darwiniano hay en el Darwinismo Cuántico? Claramente, se da la supervivencia del mas apto, y la aptitud se define como en la selección natural, a través de la capacidad de procrear. El teorema de no clonación implica competencia por los recursos - espacio en E [el entorno] - de modo que sólo los estados punteros se pueden multiplicar (a expensas de su competencia complementaria). También hay otro aspecto de esta competencia: la enorme memoria disponible en el Universo como un todo es, sin embargo, limitada. De

²⁸⁶Tras la revolución copernicana -no estamos en el centro del universo-, la darwiniana -somos una especie más emparentada genealógicamente con las demás- y la freudiana - que desvela el lado inconsciente de la mente, nos encontramos, según Floridi [2011], en la cuarta revolución -somos organismos interconectados mediante al información o *infos* que viven la *infosfera*-.

modo que surge la pregunta: ¿ qué sistemas llegan a ser ‘de interés’ e imprimen su estado en sus entornos favorables, y cuáles son los entornos? Además, como el Universo tiene una memoria finita, los eventos antiguos serán ‘sobrescritos’ por otros nuevos, de modo que parte del pasado dejará de reflejarse gradualmente en el registro actual.” [Zurek, 2009, p.9]

Del programa de investigación liderado por Zurek se podría concluir que la analogía con el proceso de selección natural muestra dos planos distintos o dos niveles analógicos distintos:

- 1.- **Darwinismo cuántico en sentido amplio:** los estados cuánticos que representan al sistema compuesto sufren el proceso de decoherencia física y la selección inducida por el entorno. El cálculo se resuelve mediante el tamiz de predictibilidad, que distingue cuales son los estados más estables o robustos candidatos a estados clásicos. Esta propiedad es la responsable de su capacidad de multiplicación en el ambiente sin ser modificados, lo que les lleva a ser más accesibles a la observación que el resto de los estados cuánticos.

En este sentido, Zurek sostiene que “para construir la analogía con el darwinismo: ciertos estados - los estados puntero - “sobreviven” a la interacción con el entorno y “procrean” imprimiendo copias de sí mismos en el entorno”[Zurek, 2007b, p.1].

También expone la misma idea, ahora bajo el ropaje del concepto de información: “[...] la proliferación selectiva de la información sobre ciertos estados preferentes a través del entorno” [2011, p.107].

En definitiva, la analogía darwinista se extendería a todo el proceso de evolución desde los estados cuánticos a los clásicos como fruto de dos procesos: “la selección inducida por el entorno equivale a selección natural” [Zurek, 2003, p. 759] y el proceso de transferencia de información al entorno, Darwinismo Cuántico, que se mediría gracias a la ‘reproducción diferencial [id.].

- 2.- **Darwinismo cuántico en sentido estrecho:** se refiere exclusivamente al último paso del Darwinismo Cuántico en sentido amplio, a saber, el modelo de multiplicación masiva de los estados cuánticos [Zurek, 2010, p. 421].

Con otras palabras, el Darwinismo Cuántico representaría la dinámica de proliferación de la información que se contabiliza mediante la redundancia de la información seleccionada.

Adelantamos aquí que no consideraremos esta relación de analogía. La razón es que el Darwinismo Cuántico entendido como pura copia masiva no puede considerarse un proceso darwinista. Esta afirmación es independiente de si el concepto de reproducción contiene al de copia²⁸⁷, pues la reproducción está relacionada con la

²⁸⁷ A este respecto es interesante recordar que esta puede ser una de las múltiples submetáfora que se encuentran en la analogía.

producción de nuevos individuos del mismo tipo que los progenitores, y de que la relación entre estados “progenitores” y su descendencia sea formal y no material, pues se pueden considerar casos extremos en los que la maquinaria es exterior al progenitor [Godfrey-Smith, 2009, p.152]. Recordemos que estamos interesados en evaluar la analogía formal, o sea, la semejanza horizontal sólo se deriva de las relaciones de verticalidad y es independiente de las relaciones horizontales de semejanza entre propiedades.

Entender el Darwinismo Cuántico como analogía en sentido estrecho del darwinismo significaría ignorar que la multiplicación de estados se debe a su persistencia ante la acción del entorno. En consecuencia, la selección inducida por el entorno es lógicamente anterior a la reproducción diferencial, pues todos los estados, a fin de cuentas, tienen la misma capacidad de quedar correlacionados, h.e. de “reproducirse” pero no de “sobrevivir” sin cambiar. Zurek, sin duda, se ha dejado llevar por un concepto de selección natural resumido en “la supervivencia del más apto”. Pero, el proceso darwinista (4), que sostiene la multiplicación masiva de los punteros, puede convertir el lema spenceriano en tautológico [Popper, 1972;1979]. Los individuos más aptos, los punteros, son aquellos que “sobreviven” y, por lo tanto, “la supervivencia sería de los que sobreviven”. El problema vuelve a ser la confusión entre contabilidad y agencia: la explicación atiende a las causas - la aptitud- y no a la contabilidad por sus efectos - la supervivencia-. La primera es fruto de la interacción con el ambiente y no de la reproducción.

Por último, aunque interpretáramos el Darwinismo Cuántico en el sentido de “eficacia diferencial”, ya que los individuos dejan “número distintos de descendientes”, se debe tener presente que este hecho podría ser puramente accidental o aleatorio. Por tanto, sólo la reproducción no implicaría selección natural, pues el éxito sería consecuencia de fluctuaciones estadísticas azarosas. En definitiva, estamos más próximos al punto de vista de Charles Bennett cuando afirma que el proceso de Darwinismo Cuántico en sentido estrecho se parece más al concepto de *spam* en informática [Zurek, 2014].

Antes de comenzar la exposición de la analogía del Darwinismo Cuántico en sentido amplio, debe tenerse en cuenta que Zurek describe todo el proceso de emergencia de la experiencia de un mundo clásico desde varias perspectivas: (1) utilizando conceptos operacionales como medida y preparaciones, (2) describiendo los procesos que sufren los estados y las propiedades de los sistemas y (3) en términos “teórico-informacionales” de transferencia de información entre el sistema y el entorno. Los argumentos de Zurek se deslizan inopinadamente entre dos perspectivas distintas: el instrumentalismo y el realismo.

El primer y el tercer enfoque descriptivo sería propio de un instrumentalista y el segundo enfoque se podría atribuir a un realista. Recordemos que en una caracterización mínima en la interpretación de la teoría cuántica²⁸⁸, para el realista, los sistemas individuales poseen

²⁸⁸Ver [Van Frassen, 1991].

propiedades, que el formalismo es capaz de predecir asignando probabilidades. También insiste en eliminar la medida como concepto primitivo y confiere a los estados cuánticos la representación del propio sistema individual o del conocimiento sobre él.

En contraste con el realismo, la noción de estado físico del sistema como concepto primitivo es un sinsentido para el instrumentalista. Los sistemas individuales no poseen valores previos a la medida. El concepto de medida es fundamental, de ahí que desee describir el mundo en términos operacionales: la teoría sólo debe usar conceptos relacionados con las operaciones que se desarrollan en el laboratorio como la medida, la preparación y en general conceptos macroscópicos. En este sentido, el informacionismo sería una variante del instrumentalismo en el que dichas operaciones serían las propias del ámbito de la teoría de la comunicación y la computación.

Más adelante, trataremos de la analogía en el marco de la teoría de la información. En lo que se refiere a esta sección, la analogía formal entre el darwinismo de Darwin y el cuántico, consideraremos, por lo argumentado en la sección dedicada a la interpretación existencial, que los estados cuánticos son de naturaleza óptica aunque no nos sea posible precisar más sin una interpretación de la teoría.

Para evaluar la bondad de la analogía parece primordial comenzar por estudiar la posibilidad de determinar si en el caso cuántico el conjunto de estados constituye una población²⁸⁹. Una vez satisfecha esta condición previa se puede investigar si tal población es darwiniana. Por esta razón, la analogía material sobre la que se levantará la analogía formal del Darwinismo Cuántico en sentido amplio es considerar que los estados cuánticos son entidades del mundo independientemente de cual sea su naturaleza. Además, los estados cuánticos se podrían agrupar en poblaciones (colectividades) siguiendo la analogía termodinámica propuesta por von Neumann [1932, pp. 157-173].

Como es bien sabido, el concepto de estado de un sistema es muy intuitivo en la física clásica : existe una relación biyectiva entre las propiedades físicas de los sistemas y su representación matemática. Dicho de otro modo, los sistemas son entidades físicas del mundo -e.g. partículas, campos, etc.- que poseen propiedades bien definidas como la posición y la velocidad, que se representan en el espacio físico o en el espacio de las fases. Por contra, en la teoría cuántica, la representación del estado del sistema es un rayo en el espacio de Hilbert abstracto y su conexión con las propiedades de la experiencia se obtiene a través de la medida, representada mediante los operadores hermíticos en el mismo espacio abstracto. En general, la asignación de propiedades sólo se puede predecir con cierta probabilidad.

Según Zurek, desde un punto de vista operacional, los estados cuánticos muestran las siguientes propiedades [2011, 139-140]:

²⁸⁹La individualidad darwiniana se asocia a entidades autopoyéticas capaces de desarrollarse y reproducirse en el sentido de constituir una nueva entidad [Godfrey-Smith, 2014, p.68].

- 1.- No son siempre perfectamente distinguibles clásicamente unos de otros.
- 2.- Son “frágiles” ante la interacción entre sistemas. Lo que implica que,
- 3.- no es posible clonar un estado desconocido.
- 4.- Pueden existir en superposición y cuando representan a sistemas multicomponentes,
- 5.- pueden encontrarse entrelazados o enredados

Como hemos apuntado en las partes II y III de este trabajo, es factible experimentalmente mantener la superposición y el entrelazamiento incluso a escala macroscópica - e.g. experimentos de interferencias con fullereno²⁹⁰ C_{70} - siempre y cuando los sistemas se mantengan bien aislados del entorno.

De ahí que la desaparición de estas propiedades y la transformación de los estados cuánticos en cuasi-clásicos se pueda atribuir a la decoherencia que formaliza la interacción de los sistemas con el ambiente. Esto oculta la posible observación de las interferencias aunque no destruye la coherencia, simplemente la diluye en los inmensos grados de libertad del ambiente.

Los estados “cuasi-clásicos” adquieren propiedades clásicas accesibles de manera objetiva - h.e., son perfectamente distinguibles, robustos ante la medida, clonables, no están en superposición ni entrelazamiento cuántico, etc. - mediante la medida indirecta sobre las copias redundantes que han dejado en el ambiente -Darwinismo Cuántico-.

Según hemos visto en la interpretación existencial, la emergencia de la propiedades clásicas es inferencial y conceptual puesto que no se pueden predecir los estados clásicos observables con total precisión y el marco conceptual clásico se ve desbordado por la naturaleza cuántica de los estados. Por eso se introducen términos nuevos como partícula, onda, etc junto a doctrinas como las de la complementariedad.

Por comodidad, el proceso completo de Darwinismo Cuántico estudiado en las partes II y III se sintetiza en el diagrama 8.1.

8.4.1. Análisis conceptual

En la presente sección, analizamos los conceptos clave relacionados con el establecimiento de la analogía que se convierten en submetáforas sobre las que se apoyaría el Darwinismo Cuántico.

- **El darwinismo de Darwin** se identifica con la evolución por selección natural en la caracterización de la primera parte de este trabajo.

²⁹⁰El fullereno o fulereno es una forma alotrópica del carbono que constituida por estructuras esféricas o elipsoidales de 20, 60, 70, etc. carbonos.

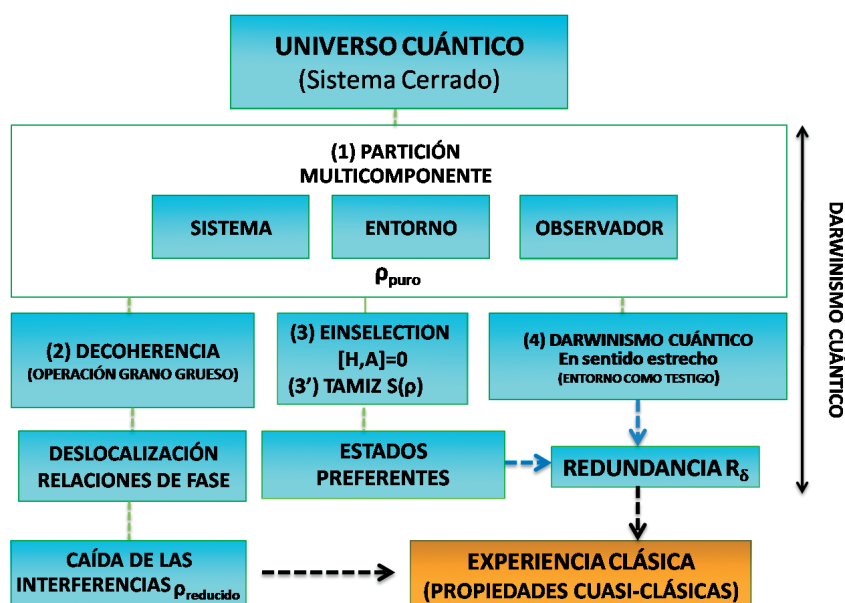


Figura 8.1: Esquema formal de aplicación del modelo de Darwinismo Cuántico a la transición cuántico-clásico. Ver resumen de la tercera parte en la página 161.

- **La selección natural** es el proceso cuántico completo²⁹¹ - (1) partición multicomponente del universo, (2) decoherencia, (3) selección inducida por el entorno y (4) darwinismo cuántico, que Zurek resume en el lema: “la supervivencia del más apto” [Zurek, 2007a, p.25].
- **los individuos** estarían representados por los sistemas con los estados cuánticos considerados como ónticos en el sentido de que la función de onda representa una característica real de un sistema individual y no las características de una colectividad o los grados de creencia de un agente²⁹².

En este sentido una colectividad de ellos constituiría metafóricamente a una población. El modelo análogo sería la unidad interactor-replicador de Dawkins [1976], tomando por replicador al estado cuántico. Este caso se asemejaría a los modelos de “evolución cultural” o de la memética. Como recuerda Godfrey-Smith [2009, p. 149 y ss.] ciertas variedades culturales o ideas como “los comportamientos, estados mentales o artefactos” [ib., 152] pueden constituir poblaciones darwinistas con capacidad de multiplicación. Éstas variedades culturales serían análogas a los estados cuánticos.

- **las nuevas especies** se relacionan con los estados puntero que son “las ‘especies más robustas’ y adaptadas al entorno” [ib., p.24].
- **La variabilidad** es posible gracias al “teorema de no clonación” [Wooters y Zurek, 1982] que sostiene la imposibilidad de crear copias perfectas de un estado cuántico desconocido.

²⁹¹ Se puede consultar en las conclusiones de la tercera parte de este trabajo (pag. 161).

²⁹² Ver [Maudlin, 2019, cap.3].

Los estados que menos varían de esas “copias imperfectas”, son lo que más procrean. Por lo tanto, hay variabilidad de la progenie cuántica que facilita la hipotética “diferencia en aptitud”, pues para los estados puntero el teorema de no clonación “no es un obstáculo cuando ‘clonar’ no involucra un estado cuántico desconocido, sino un observable autoseleccionado [*einselected*] que es ‘el más apto’ -que ya ha sobrevivido a las presiones evolutivas de su entorno y puede producir copiosa información- progenie teórica” [Zurek, 2007a, p.15].

- **La aptitud** del estado se identifica por su robustez ante la acción del entorno o la capacidad de mantenerse inalterado ante la acción del ambiente. Podría, por ejemplo, ser una propiedad disposicional. Se evalúa gracias a la conmutación nula con el hamiltoniano de interacción o al tamiz de predictibilidad que se implementa mediante la operación de traza sobre el cuadrado del estado puro o también por la entropía de von Neuman como se muestra en la sección 4.3.2.
- **herencia:** la estabilidad o robustez de los estados puntero ante el entorno es la responsable de la capacidad para “procrear” sin ser alterados. O sea, hay una relación progenitor prole en aptitud que se “hereda” y pasa a un “número de «descendientes» del estado en cuestión” [ib., 129].
- **La reproducción** sería de tipo formal en sentido de que para replicarse se utilizan otras entidades, e.g. baños de fotones, moléculas, etc. La reproducción formal se relaciona con aquellas entidades que reproducen su estructura gracias a mecanismo y materiales externos. De la misma manera que lo hacen entidades como los priones y los virus [ib., 79].

En el caso cuántico la reproducción se establece mediante analogía con los sistemas que “imprimen sus estados en el entorno” [Zurek, 2009, p.9]. Es decir, parece que Zurek sostiene una posición sustancialista, al modo de la jerga replicador-interactor de la memética, a saber: separa el sistema del estado al modo de la división materia-forma.

Todos los estados se reproducen, replican o multiplican. Pero, la “copia”, en realidad, es una determinada correlación, que puede calcularse mediante la información mutua. El proceso de copia, selección y transferencia de información se debe a la linealidad y preservación del producto escalar (ver 5.1) en la dinámica unitaria gobernada por el hamiltoniano de interacción de sistema y entorno²⁹³. Los estados preferentes y los punteros se replican de una forma muy especial. En efecto, el postulado de predictibilidad, que impone la certidumbre de encontrar en una segunda medida el mismo resultado que en la primera, implica que sólo será posible encontrar los estados

²⁹³“ los estados del sistema S , cada una de las cuales lleva al estado colectivo de todas las copias a la correlación con $|s_j\rangle$ > próximas a la ortogonalidad con el estado colectivo de todas las copias correlacionadas con $|s_k\rangle$ > que permanecen sin perturbar pueden hacer copias imperfectas.”[Zurek, 2003, p.129].

ortogonales - los máximalmente predecibles- puesto que la probabilidad asignada a su producto escalar 0 ó 1 refleja su certidumbre, esto es, la máxima distinción entre estados [Zurek, W.H., 2011, pp. 194-197].

El número de descendientes se contabiliza mediante el algoritmo de **la redundancia**²⁹⁴ que se calcula gracias a la relación entre la información mutua -correlación sistema fragmento-, también denominada información accesible, y la entropía del sistema, según la siguiente expresión:

$$\mathcal{R}_\delta \leq \frac{I(S : F)}{H(S)}$$

Este parámetro sería una medida de la eficacia del rasgo aunque el ratio de cambio de la redundancia, $\dot{\mathcal{R}}(t)$, se encuentra “tal vez más próxima a la definición de aptitud usada en la modelización de la selección natural” [Zurek, 2003, p.762]. Así el rasgo, la robustez, se identificaría directamente por su efecto, la redundancia. Zurek, volvemos a advertir, confunde contabilidad con causalidad al igual que los partidarios del punto de vista del gen en evolución y del darwinismo universal²⁹⁵.

Como vimos en (5.5), el incremento de la redundancia corresponde al incremento de correlaciones en el tiempo, responsable de la extensión de la cadena de Von Neumann desde el entorno próximo a otros entornos más lejanos²⁹⁶. La extensión de la correlación entre distintos entornos es como “[...] «información genética» [que] se pasa mediante «la progenie» del estado original” [ib., 762].

- **El entorno** es un sistema cuántico de infinitos grados de libertad que puede extenderse hasta el continuo. Su complejidad es la responsable del comportamiento irreversible de los sistemas cuánticos y, por lo tanto, de quebrar su evolución unitaria que desencadena el régimen clásico.

El entorno se puede ejemplificar físicamente como un baño de calor, un baño de fotones, fonones, de espines, de bits cuánticos o *qbits*, un conjunto de osciladores, etc. [Zurek, 2007a, p. 21]²⁹⁷. En la naturaleza y en la mayor parte de los experimentos

²⁹⁴ Como hemos comentado más arriba, Zurek describe este proceso también en el marco instrumental de las teorías de la información, lo que implica la confusión entre los conceptos de estado, correlación e información. Por ejemplo, también define la redundancia como “ el número de veces que la información sobre el sistema ha sido copiada” [Zurek, 2003, p.761], que se especifica para una base determinada y es equivalente al “número de bits ambientales perfectamente correlacionados con la base preferente del sistema” [ib., p.762]. Como apuntábamos en (5.5), además es también medida de objetividad, pues nos facilita “el número de fragmentos independientes del entorno que aportan la información clásica” [Zurek, 2009, p.3].

²⁹⁵ Se puede estudiar con detalle la crítica al darwinismo del gen en [Gould, 2004, p. 643-644].

²⁹⁶ En el ejemplo que hemos desarrollado en (5.6), $\mathcal{R}(t)$ “podría representar el número total de nuevas puertas c-NOT que actúan en el tiempo t y $\dot{\mathcal{R}}(t)$ el número de c-Nots adicionales por unidad de tiempo.

²⁹⁷ Un modelo de entorno habitual en la bibliografía lo representan la combinación de un número ingente de osciladores armónicos cuyos grados de libertad vienen representados por los modos de oscilación. Para que este modelo funciones se requieren un espectro de frecuencias casi continuo y los estados del entorno pueden ser

de laboratorio, los grados de libertad del entorno son desconocidos y no son controlables²⁹⁸.

Independientemente de su naturaleza, hay varias diferencias entre los entornos darwinianos y los cuánticos.

Para Darwin el entorno es externo al organismo y está relacionado con las condiciones de existencia. Esta separación diferencia las causas desconocidas fruto de la variación de aquellas atribuibles a la selección [Lewontin, 1998, p.51]. En la concepción actual del evolucionismo²⁹⁹, el ambiente se considera en un sentido más amplio y está modelado por el concepto de nicho ecológico [ib., 57 y ss.]. Por contra, los entornos cuánticos no sólo están formados por los grados de libertad externos al sistema, también forman parte de él los grados de libertad internos³⁰⁰. No obstante, en el momento inicial previo a la interacción cuántica, el entorno, el sistema y el observador deben considerarse perfectamente separados. Durante la interacción se entrelazarán y perderán la individualidad.

Los entornos cuánticos pueden clasificarse por la pureza: a los representados por estados puros, Zurek los denomina entornos puros. Si muestran cierta “impureza” - o sea, su entropía inicial es distinta de cero-, los denomina “brumosos” (*hazy environments*). En la jerga de la información, se corresponderían con los canales ruidosos de la teoría de la comunicación [Zurek, 2010b, p.]. Además, existen entornos ruidosos con o sin memoria, es decir, ambientes compuestos por entidades estadísticamente independientes o que muestran cierta dependencia.

Respecto a su función se pueden distinguir tres tipos de entorno: (1) los grados de libertad ignorados, (2) los grados de libertad responsables de la evolución no unitaria y (3) los grados de libertad que operan como canal cuántico de comunicación.

La función esencialmente negativa, como censor, corresponde a los dos primeros tipos de ambientes. En efecto, en el mecanismo de decoherencia, el entorno viene representado parcialmente por aquellos grados de libertad ignorados al tomar la traza parcial cuando se calcula, localmente, la distribución estadística de los resultados. Como vimos, ignorar ciertos grados de libertad no es más que aplicar una operación de “grano-grueso” (*coarse grainig*)³⁰¹ y ésta es de tipo convencional e incluso subjetivo.

estacionarios o variar con el tiempo [Zurek, 2009, p. 3].

²⁹⁸Desde los últimos años del siglo pasado, se han llevado a cabo experimentos con iones, como el Be^+ , en trampas de Paul en los que, bajo un entorno controlado, se estudia la decoherencia de los estados de movimiento de sus centros de masa. También con superposiciones de dos flujos de campo magnético macroscópico, etc. Consultar [Wineland et al., 2003].

²⁹⁹A este respecto, es interesante la distinción que plantea Brandon en [1990, cap. 2].

³⁰⁰Como observa [Wallace, 2008, p. 25], los grados de libertad macroscópicos pueden perder la coherencia debido a la interacción con los grados residuales del propio sistema. Un ejemplo de grados de libertad internos a un sistema macroscópico pueden ser sus vibraciones internas entre distintos niveles energéticos.

³⁰¹*Coarse graining* se puede traducir al español como “a bulto” y *fine graining* con detalle.

Por otro lado, la caída de las interferencias se debe a los numerosos grados de libertad del entorno cuya correlación con el sistema es responsable de su evolución no unitaria.

El medio ambiente puede funcionar “como agente de radiodifusión, clonando implacablemente la información acerca de los estados del puntero *einselected*” [Zurek, 2003, p.719]. La estabilidad de las correlaciones cuánticas entre el sistema y el observador se establece a través del entorno, que se convierte en verdadero canal cuántico de comunicación [Olliver, Poulin y Zurek, 2005, p.4].

Ahora bien, y esta es una de las claves sobre la que se apoyarán parte de nuestras conclusiones sobre la plausibilidad de la analogía: no todos los entornos son buenos canales de comunicación pues la mayoría introducen ruido [Zurek, 2009, p. 3]. Para que un canal de comunicación sea óptimo, la estructura y evolución del entorno debe respetar la no interacción entre sus diversos grados de libertad. Por esta razón, un baño de fotones constituye un canal ideal de comunicación pues los fotones no interaccionan entre ellos y, por el contrario, las moléculas de aire representan canales muy ruidosos de los que es casi imposible rescatar información [Zurek, 2009, p. 4].

Esto significa que no pueden existir interacciones entre los sistemas asociados a los estados una vez han sido “copiados”. No hay descendientes de la interacción entre los subsistemas que forman parte del entorno. Si no fuera así, el supuesto rasgo de robustez quedaría diluido. Por ejemplo, al chocar dos moléculas se entrelazarían los estados y no “sobreviviría” los punteros. Por tanto, la única forma de que la población de estados robustos aumente requiere de la incorporación de entornos nuevos. El aumento de la redundancia se debería a la “migración de entornos”.

Relacionado con la bondad del entorno como canal de comunicación, se encuentra otra característica importante: su naturaleza no monolítica. En efecto, el entorno debe poder dividirse en subsistemas para que la información quede accesible a distintos observadores y éstos puedan realizar medidas de propiedades incompatibles sin alterar mutuamente su resultado [Zurek, 2009, p. 2]. Ciertamente, imponer la independencia física entre distintos observadores puede suponer la introducción de propiedades clásicas. En general, esta cuestión nos recuerda que, en los sistemas cerrados, la subdivisión del universo en subsistemas es convencional. Cada modelo de decoherencia y de Darwinismo Cuántico se caracteriza mediante una partición entre sistema, entorno y observador y una estructura de subsistemas.

El carácter convencional de la estructura de subsistemas no es una cuestión menor porque la dinámica de la decoherencia depende de los hamiltonianos de interacción y, por lo tanto, la selección de las bases privilegiadas y el establecimiento de correlaciones estables entre sistema, entorno y observador dependen del criterio de descomposición del universo. Dicho de otra manera, los mecanismo de decoherencia y de Darwinismo Cuántico al tomar una división del universo en subsistemas³⁰², con

³⁰²Los subsistemas pueden no estar entrelazados entre ellos sino meramente correlacionados clásicamente

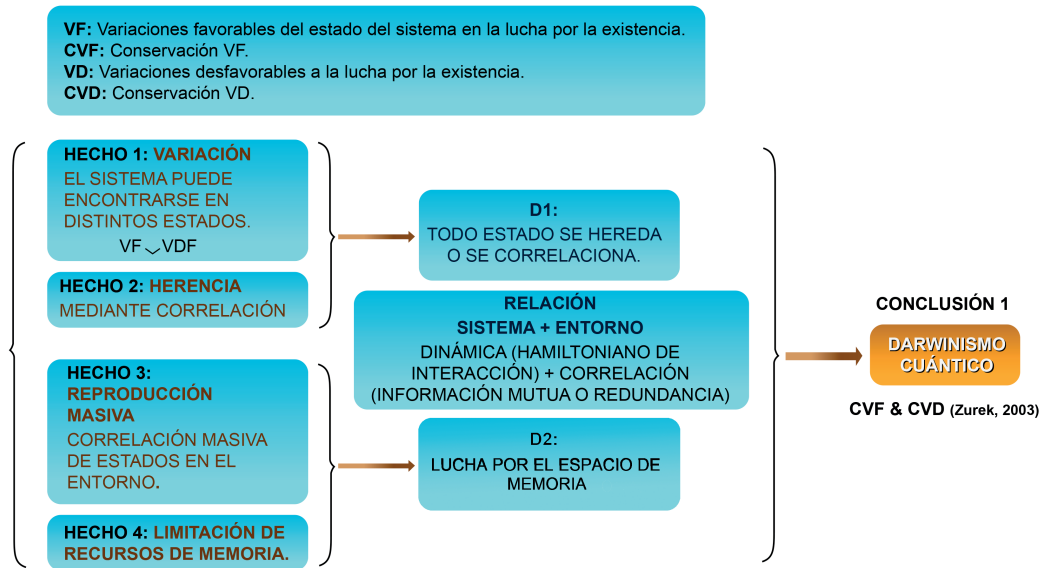


Figura 8.2: Argumento del Darwinismo Cuántico.

sus estados iniciales correspondientes, fijan la estructura de ramificación lo que tiene consecuencias para la interpretación everettiana³⁰³.

- **La competencia por los recursos** se relaciona con limitación de la enorme memoria disponible en el Universo [Zurek, 2009, p.9]. Esa “lucha” por el espacio disponible se sanciona mediante la selección inducida por el entorno³⁰⁴.
- **La extinción** tiene su contrapartida en la sobrescritura³⁰⁵ y la consecuente desaparición de una correlación en beneficio de otra.

La estructura argumental del Darwinismo Cuántico se puede extender por analogía al de Darwin, según muestra su incorporación en este esquema (fig.8.2):

- **Hecho 1.-** Hay variedad entre los distintos estados³⁰⁶.
- **Hecho 2.-** Los estados del sistema se pueden “heredar” o correlacionarse con los del entorno.

[Blume-Kohout y Zurek, 2006, p. 7].

³⁰³Ver [Blume-Kohout y Zurek, 2006, p. 7].

³⁰⁴Los estados punteros seleccionados no sólo son mejores para sobrevivir en el medio ambiente, sino que también difunden información sobre ellos mismos y extienden sus “copias” por el resto del universo. Esto conduce a analogías con el “estado físico” en el sentido darwinista, y sugiere considerar la einselección [selección inducida por el entorno] como una especie de selección natural [Zurek, 2003, p. 759].

³⁰⁵“[...] los eventos antiguos serán ‘sobrescritos’ por otros nuevos, de modo que parte del pasado dejará de reflejarse gradualmente en el registro actual. Y si no hay registro de un evento, ¿realmente ha sucedido?” [Zurek, 2009, p.9].

³⁰⁶Partimos de estados ónticos.

- **Deducción 1.-** Toda variación entre estados puede “heredarse” - o establecerse mediante correlación -.
- **Hecho 3.-** Cuando el sistema interacciona localmente con un entorno estructurado $\{\epsilon^{(k)}\}$, se produce la correlación masiva.
- **Hecho 4.-** Hay limitación de memoria disponible.
- **Deducción 2.-** “Lucha” por el espacio de memoria disponible localmente o adaptación diferencial.
- **Deducción 1 y Deducción 2.- Darwinismo Cuántico:** (1) la selección inducida por el entorno resulta un “filtro” por estabilidad ($[A, \hat{H}_{\mathcal{S}\mathcal{E}}] = 0$) o tamiz de predictibilidad ($S(\rho_i) \geq S(\rho_j) \dots \geq S(\rho_k) \sim 0$), que selecciona los estados puntero por su estabilidad y cuya persistencia³⁰⁷ facilita su (2) multiplicación masiva local en el entorno \mathcal{R} (Darwinismo Cuántico) y puede desencadenar una cadena de interacciones con entornos próximos en cierto tiempo \mathcal{R} .

La experiencia clásica está garantizada mediante “la definición operacional de existencia objetiva” [Zurek, 2008, p.24] y es fruto de la correlación entre estos estados puntero y los estados de la memoria de los observadores bajo el marco de la interpretación existencial.

La analogía formal se expresa comparando la aparición de las especies en el dominio fuente (F) con la aparición de los estados puntero en el dominio tema (T). Siguiendo el criterio de las analogías explicativas abductivas de tipo probabilístico (7.4.1), las hipótesis implican cierta analogía positiva (P).

- **Analogía hipotética:** la acción de la selección natural (H) es la explicación más probable a la aparición de nuevas especies (P) al igual que el Darwinismo Cuántico (H*) -hipótesis bajo análisis- es la explicación más probable (P*) a la “amplificación selectiva de la información sobre los estados puntero” [Zurek, 2003, p.136].

Previo al análisis y para comodidad del lector, recordaremos sucintamente las distintas hipótesis de Darwin o darwinismos de Darwin³⁰⁸.

Antes de 1837, Darwin mantiene la concepción fijista de sus coetáneos. Llamaremos Darwin (1) a la primera hipótesis en la que el naturalista inglés contempla un cambio de tipo saltacionista. Posteriormente, en la denominada segunda hipótesis, Darwin (2) sostiene que la transformación de las especies se produce de forma gradual respondiendo al cambio

³⁰⁷“bajo la definición operacional de existencia objetiva de los estados físicos: Para existir, un estado tiene que, por lo menos, persistir o evolucionar de forma predecible a pesar de la inmersión del sistema en su entorno”[Zurek, 2008, p.24].

³⁰⁸Los distintos tipos de darwinismo se encuentran resumidos en las conclusiones de la primera parte de este trabajo (63).

del entorno y, en situación de aislamiento, combina una reproducción endogámica sobre la que actúa la selección natural negativa. En una nueva formulación, Darwin (3), se defiende que el mecanismo director principal es el principio de selección natural negativo, entendido al modo malthusiano de lucha interespecífica, que opera sobre variaciones azarosas de los individuos. A diferencia del caso anterior, en torno a la publicación de *El origen de las especies*, la cuarta hipótesis de Darwin (4) incorpora la competencia intraespecífica y, por tanto, la adaptación del organismo se convierte en relativa. La selección natural así entendida nunca cesa de actuar sobre el individuo. Por último, la última hipótesis mantenida por Darwin (5) se caracteriza por una apertura a la posibilidad de un pluralismo ontológico tanto de las unidades de selección como de los mecanismos causal del proceso evolutivo.

Ahora podemos enunciar los tipos de analogías relacionadas con los ámbitos tratados en la sección dedicada a los conceptos clave.

1.- Analogías relacionadas con el concepto de “lucha por la existencia”.

- **Analogía negativa AN1:** el Darwinismo Cuántico -hipótesis bajo análisis- es la explicación más probable de la estabilidad de los estados puntero - esto es, la estabilidad del régimen clásico- o, dicho de otra forma, de “cómo los aspectos ónticos -la existencia fiable de los estados clásicos- puede emerger del sustrato cuántico”[id.]. Por contra, la acción de la selección natural (H) es la explicación más probable a la adaptación relativa e inestable (P) pues en caso contrario el proceso de SN se detendría. Es decir, el Darwinismo Cuántico conduce a la estabilidad mientras que sólo en el caso del darwinismo de Darwin de los tipos 2 y 3, en los que no se contempla la lucha intraespecífica, se llega a una meseta de estabilidad que equivale a la adaptación perfecta en el caso de que no cambie el entorno.
- **Analogía negativa AN2:** La evolución por selección natural de Darwin requiere de una secuencia iterativa. Esta explica el cambio medio en los rasgos de la población en el tiempo. En el Darwinismo Cuántico el cambio no es consecuencia de un proceso iterativo. Se resuelve en un sólo paso.

2.- Analogías relacionadas con el cambio y el gradualismo.

- **Analogía negativa AN3:** el cambio es continuo, gradual y, al paso de una cantidad de tiempo suficiente, aumenta la complejidad. En el Darwinismo Cuántico no aumenta la complejidad
- **Analogía negativa AN4::** la evolución por selección natural es creativa. El Darwinismo Cuántico no crea nada nuevo.

En efecto, la emergencia de las nuevas formas de vida se podría considerar ontológica pues las cosas y algunos de sus atributos están en el mundo y son independientes de los estados de conocimiento y los dispositivos representacionales de los agentes

en Humphreys [2016, 51]. Pero en el Darwinismo Cuántico, las propiedades clásicas - robustez ante las medidas, clonabilidad, distinguibilidad, etc. - están determinadas por las propiedades intrínsecas de los sistemas cuánticos aunque sea difícil predecirlas. Por tanto, la emergencia clásica cuadra mejor con una caracterización epistémica³⁰⁹.

- **Analogía positiva AP1:** Los saltos son lagunas en el registro fósil. El Darwinismo Cuántico explica el fenómeno de “los saltos cuánticos”. En ambos casos esas lagunas se deben a la incapacidad de acceder a la información: la primera debido a la degradación con el tiempo y la segunda a su deslocalización en los grados de libertad del entorno.
- **Analogía Positiva 2:** Recordemos que para Darwin hay separación clara entre individuo y medio. La separación entre sistema, entorno y observador previa a la interacción es nítida aunque convencional en el Darwinismo Cuántico.

3.- Analogías relacionadas con el azar y la probabilidad.

- **Analogía Positiva AP3:** Darwin defiende una probabilidad de naturaleza epistémica en un mundo determinista de tipo laplaciano. Zurek también adopta una probabilidad epistémica local en un mundo determinista de tipo everettiano.

Como vimos, la asociación previa (AP) es la explicación mediadora entre la hipótesis (H) y sus consecuencias (P) y relaciona el fenómeno observado (E), los rasgos seleccionados de las especies, con las explicaciones (C) entre las que se encuentra la hipótesis (H) de la Selección Natural, bajo unas condiciones de contorno o auxiliares (ca) - e.g. permanencia de las leyes de la variación y la herencia y amplitud del intervalo temporal- y a pesar de las causas en contra (co)- e.g. posibilidad de mezcla -.

- **La asociación previa de tipo explicativo** es el proceso, iterado a lo largo del tiempo, que asocia variación, herencia y adaptación diferencial -en el que se tienen en cuenta también la reproducción- (**Selección Natural de Darwin**). Su extensión al dominio cuántico (T) es el proceso, iterado a lo largo del tiempo, de variación, herencia -correlación- y “lucha por el espacio de memoria local” -incluye la selección inducida por el entorno y la reproducción masiva (correlación estable)- (**Darwinismo Cuántico**).
- **Entre los factores críticos de la fuente** se encuentran todas las analogías negativas. Especialmente la que indica que las especies sufren cambio ontológico al contrario de los estados cuánticos y la que afirma la necesidad de iteración para la evolución biológica y la niega para la cuántica..
- **Las condiciones auxiliares** en el caso de la SN son: la amplitud temporal y la constancia de las leyes de variación y herencia.

³⁰⁹Recordemos además que el criterio operacional de existencia es epistémico.

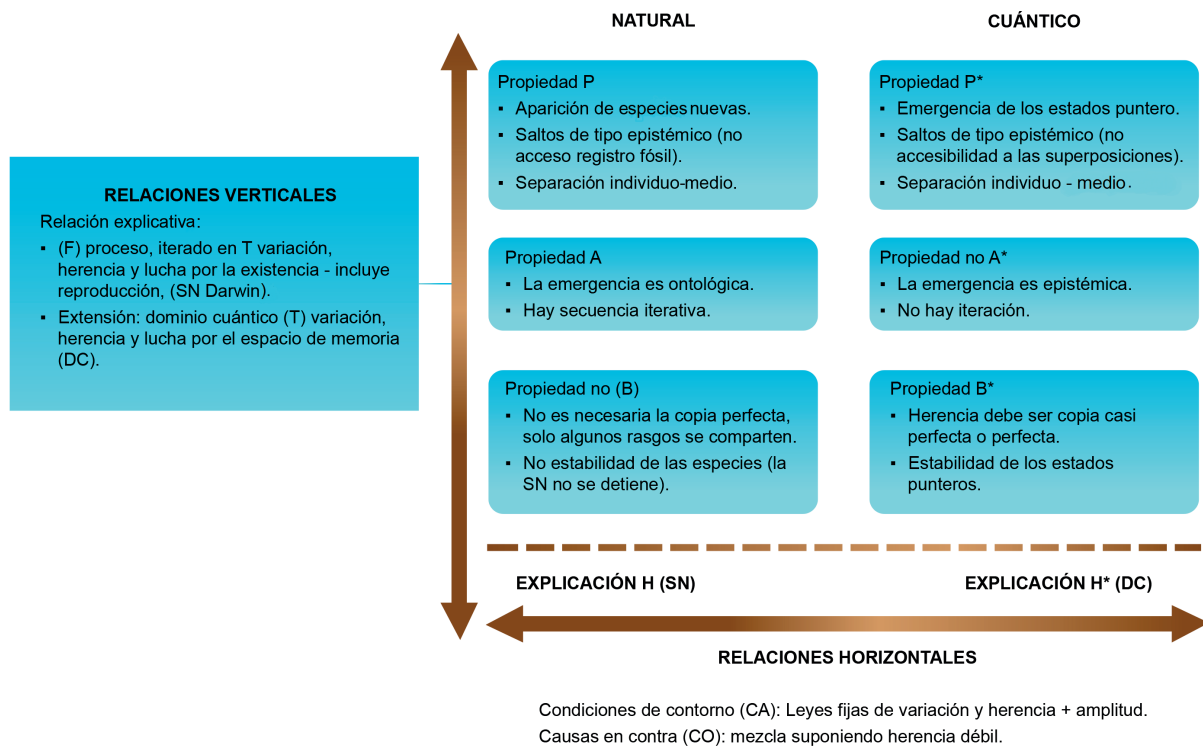


Figura 8.3: Análisis bidimensional de la analogía entre la Selección Natural de Darwin y el Darwinismo Cuántico.

- **las condiciones en contra**, la mezcla en el caso de herencia débil. El Darwinismo Cuántico propone una “herencia de tipo fuerte” que favorecería el darwinismo de Darwin.
- **Los factores críticos del tema**: todas las analogías negativas. Sobre todo la cuestión de la consecución de la estabilidad. En el caso de la selección natural, Darwin defiende una adaptación relativa e inestable.
- **Los factores potenciadores**: la analogía positiva del fenómeno de los saltos por imposibilidad de acceso a la información y la herencia fuerte.

8.5. Evaluación de la analogía formal

La representación bidimensional del modelo analógico del Darwinismo Cuántico se puede resumir en el esquema 8.3.

Como se puede evidenciar, al comparar la asociación previa en el caso de la SN (F) y la asociación previa en el caso del Darwinismo Cuántico (T), el problema de la posibilidad de la extensión de la fuente al tema se encuentra en que el proceso de evolución por selección natural darwiniano incorpora la iteración y ésta se encuentra completamente ausente en el caso del Darwinismo Cuántico. Es decir, la analogía negativa pertenece a la asociación previa. En efecto, el proceso cuántico darwinista termina una vez se ha producido “el filtrado” de los estados y la primera copia. La correlación encadenada o multiplicación se realiza en un solo paso limitado por la memoria disponible.

Como advertimos en 8.4.1, una vez que se ha completado el primer ciclo dividido en dos pasos, selección y replicación, si los sistemas del entorno, con sus correspondientes estados “copiados”, interaccionaran entre ellos o con otros sistemas, el canal se convertiría en ruidoso y sería necesario medir el medio al completo para encontrar los estados puntero. Con otras palabras, estaríamos ante el caso de la información que aporta un estado aleatorio como vimos en 5.5. Los candidatos a estados clásicos no serían los más accesibles, “los supervivientes” a la acción de este tipo de entornos. Por eso, Zurek explicaba que los fotones son un entorno o canal ideal y no las moléculas de aire [supra 8.4.1].

En consecuencia, la iteración arruinaría el proceso darwinista cuántico. Por tanto, el Darwinismo Cuántico alcanza en un sólo paso la estabilidad. Cuando Zurek propone que es posible el cambio de redundancia gracias a la incorporación de ambientes nuevos, no se cumplen las condiciones de iteración. La razón es que, como acabamos de recordar, cada ciclo de iteración se compone de dos fases, selección y replicación. Pero en el caso de la evolución de la redundancia ya no tiene lugar la selección. La correlación de entornos sería pura “replicación”. Por esta razón el cambio de redundancia no es análogo al concepto de cambio de eficacia que defiende Darwin.

Por último, el gradualismo que muestra el proceso de caída de las interferencias se deriva del modelo de simulación y no de una semejanza de procesos. En el caso de la selección natural darwiniana, el gradualismo se debe a la secuencia de iteraciones en el tiempo. Para el Darwinismo Cuántico, el gradualismo es esencialmente consecuencia del tiempo necesario para la deslocalización de las fases en el entorno o tiempo de decoherencia.

En conclusión, el fracaso de uno de los puntos esenciales de la asociación previa es fatal para la analogía: si no hay iteración no puede decirse que los estados puntero evolucionen por selección natural darwiniana (TSN). Sólo se podría afirmar que se ha producido una selección natural negativa que opera como un tamiz. Es decir, sería en todo caso un proceso análogo al principio de selección natural negativa en un paso de los darwinismo de Darwin de tipos 2 y 3. No sería plausible la analogía del Darwinismo Cuántico con el PSN de los tipos de darwinismo 4 y 5 porque el resultado final del proceso cuántico es la estabilidad, al

contrario que en el caso biológico pues recordemos que la adaptación es relativa

Por esta razón, el siguiente paso consistirá en evaluar la plausibilidad de que el Darwinismo Cuántico sea análogo a la selección natural negativo (PSNN), que estaría representada por el (PSN) de los darwinismos de tipo 2 y 3. Es más, nos centraremos en evaluar si es análogo al principio de selección natural negativo.

- **La asociación previa de tipo explicativo** es el proceso en un sólo paso que presenta variación, herencia y adaptación diferencial (lucha por la existencia) -en el que se tienen en cuenta también la reproducción- **principio de selección natural negativo**. Su extensión al dominio cuántico (T) es el proceso en el que existe variación, herencia -correlación- y “lucha por el espacio de memoria local” -incluye la selección inducida por el entorno y la reproducción masiva (correlación estable)- (**Darwinismo Cuántico**).

Es decir, el fenómeno observado de las especies supervivientes actuales se debe a la selección natural negativa en un sólo paso -que es hipótesis de la fuente y causa-, bajo las condiciones de contorno y auxiliares (ca), a pesar de las causas en contra (co). De la misma manera que los estados puntero son fruto del Darwinismo Cuántico - que es la hipótesis del tema y causa-.

En este caso, las analogías negativas de la fuente, estabilidad relativa (AN1) y la analogía negativa del tema, cambio continuo y gradual (AN3), que pertenecían a los factores críticos de una analogía darwinista evolutiva, ya no son aplicables, puesto que entendemos el PSN como aplicación en un sólo paso y en cualquier caso, la selección natural negativa llevaría a la estabilidad si no se produjera variación suficiente.

Las analogías positivas siguen siendo aplicables, saltos de tipo epistémico, es decir interpretados como faltas de información, (AP1) y probabilidad de naturaleza epistémica (AP2) derivada de dinámica determinista forman parte de los factores favorables a la analogía.

El análisis de las condiciones auxiliares que podrían bloquear la eficacia del principio de selección natural como la mezcla en los caracteres de la progenie no se contempla en el Darwinismo Cuántico, pues la “herencia formal es de tipo fuerte”, ya que los estados puntero se correlacionan perfectamente y de esta forma se hacen distinguibles.

Otra cuestión relevante para el análisis es el problema de la extinción. En el caso del Darwinismo Cuántico “los estados no se extinguen” realmente se “deslocalizan” a la manera de algunas especies que se ocultan durante años para ser redescubiertas. Pero habría extinción si imponemos un criterio formal de parada (asociado con la capacidad de memoria).

Por último, se pueden comparar la distinta naturaleza de la acción formal del entorno en el caso biológico y en el físico. Darwin apostó fuertemente por un mecanismo externo o fuerza externa o ley para bloquear explicaciones de tipo teleológico. El Darwinismo Cuántico, incorpora la acción tanto de entornos internos como externos. Aunque los modelos

se han centrado en estos últimos. En todo caso, el proceso se inicia con separación entre sistema, entorno y observador.

No se encuentra ninguna condición de fracaso en el dominio fuente para que no se pueda generalizar la analogía. Además, como las propiedades principales de la estructura de la asociación previa tienen análogos en el dominio y no se conoce ninguno que no se mantenga, entonces no hay razón para negar la posibilidad de extender la inferencia al dominio objetivo. Dicho de otra manera, se cumple la condición mínima del potencial de generalización.

En definitiva, si se considera que los estados cuánticos pueden formar poblaciones y cumplen las condiciones expuestas más arriba, es plausible que el Darwinismo Cuántico sea análogo al principio de selección natural negativo. Es decir, nos encontramos ante un proceso que exclusivamente funciona a modo de tamiz. Las características de un proceso de filtrado que no contempla un cambio ontológico de la naturaleza de las entidades filtradas. En el caso cuántico, si la naturaleza de los estados es óptica, entonces no variará.

8.6. Una analogía matemática

En este apartado se analizará la posibilidad de establecer un tipo de analogía ampliamente aceptado por la comunidad científica y filosófica: el isomorfismo nómico. Hempel se refiere a este tipo de analogía como “un isomorfismo sintáctico entre dos conjuntos correspondientes de leyes” [1976, 428]. En general, este tipo de analogía se suele plantear para conjuntos de ecuaciones correspondientes a dominios distintos de una disciplina científica como la física.

Un buen ejemplo de aplicación práctica de semejanza nómica con capacidad predictiva comprobada es la identidad estructural matemática entre las ecuaciones del flujo estacionario de calor y las de la electrostática descubierta por el propio Maxwell. La misma estructura matemática³¹⁰ con diferentes conceptos teóricos, el flujo de calor (\mathbf{h}) se sustituiría por el campo eléctrico (\mathbf{E}) y la temperatura (T) por el potencial. Por tanto, la diferencia fundamenta entre estas dos leyes es fruto de la distinta interpretación de sus términos teóricos.

Como afirma Bartha [op.cit., 209], para que se pueda considerar la existencia de una analogía formal entre dos dominios se requiere simplemente que la estructura matemática coincida. No sería necesario que ocultara una significación física. En general, a este tipo de analogías se las califica de pitagóricas. De aquí no se puede concluir que en el futuro, estas semejanzas puramente matemáticas no pudieran encontrar una explicación derivada de la similaridad entre leyes de la naturaleza. Tal vez, esta es la idea de Zurek cuando sugiere que el Darwinismo Cuántico “parece ser un hecho de vida cuántica - en cierta forma detrás de la familiar «Selección Natural»” [2009, p.9]. En consecuencia, se debe explorar la posibilidad de que el formalismo matemático de ambas teorías sea isomorfo.

³¹⁰El campo es proporcional al gradiente del potencial $E(r) = -k\nabla\phi(r)$.

Si nos centramos en las ecuaciones de la dinámica, en general, esta analogía no es plausible porque las estructuras matemáticas de la ecuación dinámica de la evolución de los estados reducidos y la ecuación de Price son muy distintas.

En efecto, la ecuación maestra³¹¹, es una ecuación diferencial en derivadas parciales de primer orden en el tiempo. En el modelo de la dispersión estudiado, dicha ecuación es lineal y se parece a las ecuaciones diferenciales de difusión con velocidad de desintegración proporcional a la concentración:

$$\frac{\partial \hat{\rho}_S(x, x', t)}{\partial t} = \frac{-i}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2}{\partial^2 x'} \right) \hat{\rho}_S(x, x', t) - \Lambda(x - x')^2 \hat{\rho}_S(x, x', t) \quad (8.1)$$

Esta expresión contrasta con la ecuación de Price para el continuo [Price, 1972, p. 489]:

$$\frac{dE(x)}{dt} = Cov(x, r) + E(\dot{x}) \quad (8.2)$$

que es simplemente la regla de la cadena de la diferenciación aplicada a la media ponderada³¹² $E(x)$ del rasgo x_i , según la distribución de probabilidad p_i .

El primero término representa a la selección natural, el término covariante relaciona el rasgo con el ratio del crecimiento de éste per capita r_i ³¹³. El segundo sumando representa la media ponderada del cambio de los valores del rasgo. Es decir, la fidelidad de la transmisión del carácter.

Si particularizamos esta ecuación para la dinámica del replicador, que es el caso más cercano al Darwinismo Cuántico, pues describe el cambio de una población infinitamente grande que se “reproduce” sin mutación, el segundo término se anula ya que el rasgo no cambia. Por tanto se obtiene:

$$\frac{dE(x)}{dt} = Cov(x, r) \quad (8.3)$$

Si ponemos esta ecuación en función de la eficacia w_j , que generalmente es una función lineal de las frecuencias x_i de la población de fenotipos, y de la eficacia media $\phi(\vec{x}) = \sum_i w_j(\vec{x})x_i$, obtenemos una ecuación diferencial no lineal de primer orden en el tiempo [Nowak, 2006, p.55]:

$$\dot{x}_i = x_i[w_j(\vec{x}) - \phi(\vec{x})] \quad (8.4)$$

que, evidentemente, no es sintácticamente isomorfa a la ecuación maestra.

³¹¹Para profundizar, consultar [Schlosshauer, 2007, cap. 33 y 4].

³¹²Ver, por ejemplo, Walker [2012].

³¹³ $\frac{dn_i}{dt} = r_i n_i$ donde n_i representa el número de individuos en el grupo i .

8.6.1. Analogía informacional

No obstante lo visto en la sección anterior, aunque las dos ecuaciones diferenciales estudiadas sean diferentes, bastaría con que se pudieran encontrar una analogía matemática en las descripciones fenoménicas, en cuyo caso, estaríamos ante una simulación análoga. Así considerada, la analogía se establecería entre dos marcos de modelización [Dardsahti, 2016, 115].

En el caso analizado anteriormente, uno sería el de la ecuación maestra (EM) que es un marco de modelización para la descripción de la dinámica de los estados reducidos procedentes de modelos fenoménicos de interacción entre sistemas cuánticos abiertos. El otro marco de modelización sería el de la ecuación de Price (EP).

Estos marcos de modelización sólo son aplicables bajo ciertas condiciones (D). Por ejemplo, la ecuación maestra para el caso que presentamos en 4.4.1 del movimiento de una partícula blanco sometida a un baño de fotones - h.e. bajo el influjo de decoherencia - tiene validez en el dominio que marcan las condiciones de Born-Markov para límite de longitudes de onda larga. De igual modo, se pueden establecer el dominio de aplicabilidad de la ecuación de Price.

Siguiendo a Dardashti [ib.,116], el análisis bidimensional de la simulación análoga sería el siguiente: un sistema (S) es análogo a uno (T) cuyos marcos de modelización serían (M_S) y (M_T), siempre bajo los dominios respectivos (D_S) y (D_T) respectivamente. En nuestro caso, deseamos establecer que la hipótesis del Darwinismo Cuántico (T) cuyo marco (M_T) es la ecuación maestra (EM) bajo el dominio (D_T) es análogo a la selección natural (S) en el marco (M_S) de la ecuación de Price (EP) bajo el dominio (D_S).

Como acabamos de exponer, es evidente que los esquemas de modelización de las dos dinámicas, la ecuación maestra y la ecuación de Price, no son isomorfos salvo en situaciones triviales. Se podría además argumentar que la dinámica evolutiva depende no sólo de las ecuaciones de evolución sino de otros factores como las condiciones iniciales y de contorno. Es decir, los dominios también condicionan los resultados del proceso.

Esto nos indica que hay otra manera de establecer la analogía: mediante comparación de la transferencia de información al entorno del Darwinismo Cuántico y de la selección natural. Es decir, sería conveniente explorar la posibilidad de encontrar una analogía fijando nuestra atención en los modelos de datos en vez de en las expresiones de la dinámica.

En efecto, si tenemos dos distribuciones de probabilidad de una población o colectividad, una del estado inicial y otra del estado final, es posible estimar las reglas de cambio gracias a la información. Así ocurre con la selección natural, la información de Fisher es una forma de explorar la dinámica poniendo la atención en las fluctuaciones de la frecuencia observadas entre dos distribuciones de probabilidad [Frank, 2009], pues mide el cuadrado de “la distancia” entre ellas dependiente de un cambio de parámetro [ib., p.233]. Es más, según Frank [ib., 241], la dinámica de la selección natural se obtiene al maximizar la información de Fisher.

De la misma manera, para Zurek la transición cuántico-clásico es fruto de un proceso de transferencia de información entre los sistemas y el entorno, pues, por ejemplo, “[...] la «progenie» del estado original transmite la «información genética».” [2003, p.43].

Así pues, de la literatura analizada se desprende la siguiente tesis: el proceso de cambio darwinista parece semejante al concepto de flujo de información.

Esto invita a analizar la analogía en los términos siguientes: el proceso de Darwinismo Cuántico, fruto de la transferencia de la información entre sistema y entorno, es análogo al proceso de “[...] cambio en eficacia causado por la selección natural [...] [debido] a la información de Fisher sobre el entorno capturada por las partículas hereditarias” [Frank, 2009, p.239].

No obstante, se podría argumentar que independientemente de que se encontrara una analogía entre los modelos de simulación, de ahí no se seguiría que fuera plausible establecer una analogía entre dos ontologías tan diferentes. En todo caso, según Dardashti [ib., 123] deberían compartir alguna característica específica³¹⁴.

Los partidarios del “informacionismo”³¹⁵ responderían con facilidad a esta cuestión: “la forma particular de las dinámicas en los sistemas observados surgen del flujo de información desde el fenómeno a la observación” [Frank, 2009, p.231]. Esto significa que si hay una posible característica compartida sería “la información” en un sentido amplio o, tal vez, en el sentido más técnico simplemente como “medida de distancia” entre dos distribuciones de probabilidad.

Pues bien, en los dos ámbitos entre los que se desea establecer la analogía, las transferencias de información estaría relacionada con dos conceptos de información: en el marco cuántico, la entropía de Shannon o von Neumann y la información mutua clásica o cuántica, y, en el biológico, la información de Fisher.

Por tanto, debemos estudiar la estructura de las ecuaciones de transferencia de información, la ecuación del cambio de redundancia en el caso cuántico y la ecuación de Price informacional en el caso biológico, para comprobar si ambas obedecen a métricas isomorfas³¹⁶.

³¹⁴En el caso de los modelos de simulación de las fuerza de Coulomb y la fuerza de gravitación universal esa característica es la dimensionalidad del espacio: ambas fuerzas se propagan con el inverso del cuadrado de la distancia en un espacio de tres dimensiones [op.cit., 123-124].

³¹⁵Por ejemplo, Zurek “De Bohr (y Wheeler) tomo la firme convicción de que cuando descubramos cómo funciona [la teoría cuántica], nos daremos cuenta de que la información era una parte integral de su maquinaria” [2011, 107]; Wheeler “Algún día comprenderemos el tiempo y el espacio y todas las otras características que distinguen a la física - y la existencia en sí misma- como órganos autogenerados de forma similar a los sistemas de información autosintetizados.” [1990, p. 16]. O, tal vez de manera más directa, como el cosmólogo George F.R. Ellis cuando mantiene que “la jerarquía causal descansa en la realidad última metafísica [...] Es posible que la información sea la llave [...]” [2004, p. 634]. Incluso, la característica compartida podría ser la información tal y como la entendiera uno de los padres de la cibernética “la información es información, no materia o energía. Ningún materialismo que no admita esto podrá sobrevivir actualmente” [Wiener, 1964, p.132].

³¹⁶En el ámbito cuántico el cambio de redundancia: $\dot{\mathcal{R}} = \frac{d}{dt} \left[\frac{I(S:F)}{H(S)} \right]$. El cambio debido a la selección natural

La cuestión fundamental a la que vamos a atender es la siguiente: suponiendo que ambas estructuras matemáticas fueran marcos de modelización adecuados, ¿son los conceptos que describen el flujo de información iguales? De otra manera, ¿el concepto de información de Fisher y el de Shannon, sobre los que asienta el concepto de transferencia de la información en el caso de la biología y de la física respectivamente, pueden constituir la característica específica común sobre la que se podría establecer una simulación análoga?

La tesis que voy a defender es que el concepto métrico de información de Fisher no tiene las mismas propiedades³¹⁷ que los conceptos métricos de información de Shannon e información mutua. Es decir, son tres medidas distintas de información:

- **la información de Fisher (IF)** se enmarca dentro de los principios de estimación en la teoría de la inferencia estadística como “la cantidad de información que se espera obtener de cada observación realizada.” [Fisher, 1959, p.149]. Donde la esperanza está sujeta a cierto parámetro θ que se debe estimar.
- **la información de Shannon (IS)** corresponde a la teoría de la comunicación y se define como la única medida de compresión, o grado de compresión de la salida de una fuente, referida a una situación de comunicación en su totalidad³¹⁸.
- **la información Mutua (IM)** dentro de la misma teoría es una medida de la capacidad de transmisión de un mensaje sobre un canal ruidoso sin que aumente la probabilidad de error.

Se podría tratar el concepto de información en el ámbito de la comunicación cuántica de manera análoga al caso clásico. La entropía de von Neumann sería la medida de compresión de la fuente de un canal cuántico sin ruido según el teorema de Schumacher y la información mutua cuántica relacionaría con la capacidad de de transmisión de mensajes sobre canales cuánticos ruidosos según el teorema HMW³¹⁹.

es proporcional a la información de Fisher capturada del entorno por las partículas de la herencia. Si tomamos la ecuación de Price del continuo, $\dot{\bar{z}} = \text{cov}(m, z) + E(\dot{z})$ con m el parámetro de Malthus y z el rasgo, e imponemos fidelidad de copia $E(\dot{z}) = 0$, entonces en función de la información de Fisher total (\mathcal{F}_{tot}) para una pequeña fluctuación “ a ”, $\text{cov}(m, z) = R_{z,a} \mathcal{F}_{tot}$, siendo \mathcal{F}_{tot} la “distancia” entre las dos distribuciones de probabilidad y el parámetro $R_{z,a}$ la regresión de la fluctuación sobre el rasgo el término que mide la amplitud de las fluctuaciones. Por tanto, la ecuación de Price respecto a la métrica de Fisher será: $\dot{\bar{z}} = R_{z,a} \mathcal{F}_{tot}$, que también se puede expresar como en 2.11: $\dot{\bar{z}} = \bar{\omega} \beta_{z\omega} \mathcal{F}(\vec{q})$. Con $\mathcal{F}(\vec{q})$ la información de Fisher.

³¹⁷En esta sección no voy a entrar a valorar esta cuestión en el marco de las teorías de la referencia. Nos parece suficiente con esta mínima caracterización.

³¹⁸No creemos necesario entrar en la polémica de si la información se puede definir y cuantificar respecto a la fuente - es decir, caracterizaría la fuente de emisión gracias al primer teorema de Shannon - o, como la hemos definido en términos de los teoremas de codificación de Shannon, en el caso clásico, y de Schumacher en el ámbito cuántico. En ambas situaciones, la información se definiría a través de los recursos del canal para codificar la emisión de una fuente con el objeto de reproducirla a la salida con precisión.

³¹⁹HMW está por Holevo-Schumacher-Westmoreland. Consultar [Nielsen y Chuang, 2009, p.572].

En conclusión, aunque se pueda establecer una relación formal entre las dos tipos de información, son métricas distintas³²⁰. Dicho de otro modo, ámbitos y problemas distintos - dinámica evolutiva y teoría de la comunicación - requieren medidas distintas. Entonces, cuando se habla de información transferida entre el sistema y el entorno, ¿a qué tipo de información se refieren?

El concepto de información se puede considerar en su aspecto sintáctico, epistémico y semántico. En los casos que hemos descrito, la información es un concepto sintáctico. El problema reside en que muchos autores³²¹, entre ellos W.H.Zurek, describen los fenómenos usando un concepto de información epistémico que es el más próximo al lenguaje ordinario. Es decir, la información es una fuente de conocimiento: la diferencia entre lo que se conoce antes y después de la comunicación.

En la sección 2.4.2, hemos caracterizado la noción clásica de información como medida la cantidad en la que se reduce la incertidumbre. También se ha descrito matemáticamente dependiendo de la concentración de las distribuciones de probabilidad apoyada en la noción de mayorización [ver apéndice B].

No obstante, advertimos de la existencia de distintas medidas de información. Esto significa que el concepto métrico de información aplicado a distintos ámbitos de la medida en ciencia se refiere al aspecto puramente sintáctico. Por tanto, la comparación de las distribuciones de probabilidad de la secuencia emitida por una fuente y registrada a la salida no necesariamente están conectadas por una ley que sirva de base para la adquisición de conocimiento. La dependencia o independencia entre las dos distribuciones de probabilidad puede ser completamente accidental.

Pero, además, la información de Fisher y la de Shannon son dos posibles medidas distintas en el aspecto sintáctico. Como conceptos métricos poseen distintas propiedades y, por tanto, son diferentes³²².

En efecto, la información de Fisher³²³ es una medida que se obtiene aplicando un principio variacional y constituye una manera de medir las fluctuaciones escalares entorno

³²⁰Normalmente se comienza pensando en la analogía que Fisher propuso [op.cit., 39] entre la termodinámica y el proceso de selección natural. Ahora bien, aunque la expresión de la entropía de Boltzman tiene cierta relación con la de Shannon, como mostramos en el apéndice B, son conceptos métricos distintos. Así que no es lícito equiparar la entropía de Boltzman con la información de Fisher. Pero además, la información de Fisher se puede obtener como la aceleración de la información de Shannon, si tomamos la segunda derivada respecto al parámetro ($\frac{d^2 H}{d^2 \theta} = \mathcal{F}$). No obstante, como afirma Frank, “esta correspondencia sólo surge si asumimos una determinada interpretación de lo que significa medir la aceleración de la información de Shannon con respecto a un parámetro” [2009, p. 242]. En todo caso, la equivalencia formal sería entre la aceleración de la información de Shannon y la información de Fisher una vez interpretada, pero no entre la información de Shannon y la de Fisher, *pace* Frank [op.cit., 242].

³²¹e.g. A. Zelinger [1999], Frank [2012], etc.

³²²Ver nota, p. 8.6.1.

³²³Matemáticamente, la información de Fisher $\mathcal{F}(\theta)$ es un funcional dependiente de un parámetro θ que viene dado por la variancia de ese parámetro θ y se expresa mediante la esperanza según: $\mathcal{F}(\theta) = E_{\theta}[\frac{\partial}{\partial \theta} \ln f(x; \theta)]^2$ [Cover y Thomas, 1991, pp.327-331]. Ver para una caracterización completa [Frieden, 2004].

a los valores ideales en las observaciones.

Imaginemos que deseáramos estimar un parámetro indefinido θ desconocido pero fijo, que porta un conjunto de N datos $\{y_1 \dots y_n = \vec{y}\}$ con una ley de probabilidad asociada $p(\vec{y}|\theta)$. La información de Fisher es aquella que se encuentra en la variable aleatoria Y sobre el parámetro desconocido del que depende la probabilidad de Y .

Es decir, la variable aleatoria contienen la información del parámetro oculta tras ruido $\{x_1 \dots x_n\}$, donde éste también es función del parámetro. Esto es, $\vec{y} = \theta + \vec{x}$. Entonces, gracias a la ley de probabilidad aleatoria y a los datos junto a un principio de optimización, se podrá estimar una función óptima $\hat{\theta}(\vec{y})$, que será, en media, mejor estimador del parámetro que cualquier dato observado.

En el caso de tomar, $x = y - \theta$, entonces la información de Fisher para el caso discreto³²⁴ $\{x_n, p(x_n)\}$ será:

$$I = \frac{1}{\Delta x} = \sum_i \frac{[p(x_{n+1}) - p(x_n)]^2}{p(x_n)} \quad (8.5)$$

En el caso de la información de Shannon³²⁵, el objetivo de la comunicación es la transmisión de mensajes con alta la fidelidad. La figura (8.4) muestra una situación típica de comunicación en la que están implicados: la fuente de información, el codificador o transmisor, el canal fuente de información (con o sin ruido), el decodificador receptor y el destinatario. En este contexto, la información de Shannon es medida de compresión de mensajes codificados en largas cadenas de señales bien estructuradas. Ésta sería la caracterización de la información derivada del primer teorema de Shannon [1948].

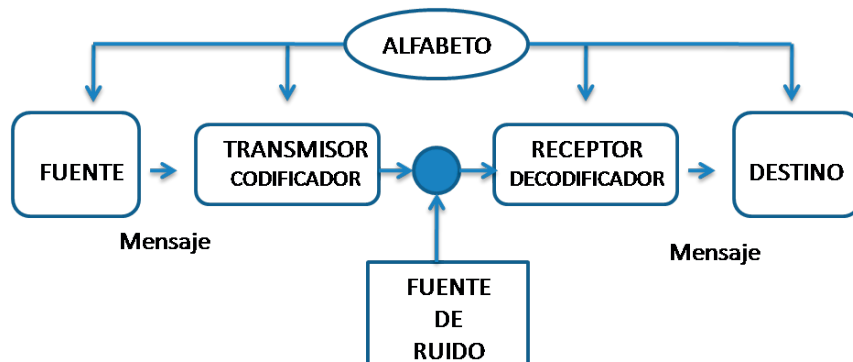


Figura 8.4: Esquema de una situación de comunicación. El círculo azul representa el canal.

De manera explícita, una fuente estadística $\{X\}$ con alfabeto formado por n letras $X := \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ a las que corresponde respectivamente una probabilidad de aparición (p_i) , genera un mensaje común con una longitud compuesta por un número muy grande ($n \gg 1$) de secuencias (e.g. $\{x_3, x_8, \dots, x_{50}\}$) coincide básicamente con el mensaje transmitido en alfabeto binario de longitud $nH(X)$. La velocidad media de transmisión es la relación entre la

³²⁴En el caso continuo, $I = \int dy \left[\frac{\partial p(x)}{\partial x} \right]^2 / p(x)$.

³²⁵Consultar apéndice (B).

capacidad del canal (bits/s) dividida por la entropía (bits/símbolo); $\frac{C}{H}$ es la cota del máximo de velocidad media superior [Shannon, 1949, p.71]. Siendo la entropía de Shannon³²⁶:

$$H(P(X)) := - \sum_i p_i(x_i) \log p_i(x_i) \quad (8.6)$$

Los dos funcionales tienen propiedades diferentes. Fijaremos la atención en el más relevante para este estudio³²⁷: la información de Shannon representa una medida global de la suavidad de la distribución de probabilidad mientras que la información de Fisher es una medida local. Esto quiere decir lo siguiente: ante un reordenamiento de datos $\{x_n\}$ se produce un cambio en la forma de la función de distribución de probabilidades. Esta acción no altera la medida de la información de Shannon mientras que la introducción de discontinuidades en $p(x_n)$ implica un cambio brusco de la información de Fisher $\frac{[p(x_{n+1}) - p(x_n)]}{\Delta x}$ [ib., p.29 y ss.].

En conclusión, las dos informaciones representan medidas distintas. Son distintos conceptos métricos independientemente de que se puedan establecer relaciones matemáticas entre ellos.

Ahora bien, el objetivo de la comparación entre la evolución biológica y su hipotético análogo se establecía en términos de la información mutua. En el marco de la comunicación, el objetivo es la transmisión de mensajes con alta la fidelidad. En consecuencia, se debe combatir el ruido y esto se consigue gracias a la introducción de cierta redundancia de datos en el código. No obstante, una codificación muy redundante es poco eficiente, es decir se ralentiza.

El segundo teorema de Shannon establece que el ritmo de transmisión del mensaje sobre un canal ruidoso se puede incrementar sin que aumente la probabilidad de error siempre que no supere la capacidad del canal³²⁸. La capacidad del canal C se define mediante el supremo sobre la distribución $p(x_i, y_i)$ de información mutua $H(X : Y)$ según $C := \sup_X H(X : Y)$ [Shannon, 1981, p.86].

La información mutua $H(X : Y)$ relaciona la distribución de salida de la fuente con la obtenida en el receptor. Si las dos distribuciones de probabilidad son independientes su información mutua es cero $H(X : Y) = 0$.

Esto no sucede en una situación normal de comunicación, por lo que se necesita calcular la información mutua relacionada con esa condición de dependencia entre distribuciones

³²⁶En el caso continuo $\int dx p(x) \log p(x)$. A diferencia del caso discreto, el valor de la *Entropía de Shannon* para distribuciones de probabilidad continua depende de la elección de las coordenadas bajo las que describamos el mensaje. Por esta razón, sólo sería aceptable esta medida entrópica en el caso continuo si estamos interesados en las diferencias de entropía (información) que son independientes de las coordenadas. Por eso, parece que la entropía fundamental tiene un carácter relativo.

³²⁷El estudio de las diferencias se puede encontrar en el capítulo primero de Frieden [2004], que ha servido de referencia para parte de esta sección.

³²⁸“El número de bits de salida correctamente transmitidos por cada bit de entrada” [Galindo, 2001, p.24].

de emisión y de recepción. Para satisfacer este objetivo se debe acudir a la distribución de probabilidad condicionada y el concepto correspondiente de información condicionada³²⁹.

El cálculo de la información mutua en función de la entropía condicional vendría dado por:

$$H(X : Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (8.9)$$

A la información condicionada $H(X|Y)$ se la denomina equivocación E porque representa la parte de la información emitida por la fuente que no registra el receptor. Desde el punto de vista del receptor, la información condicionada $H(Y|X)$ se conoce como ruido N y representa la información que no ha sido emitida por la fuente pero sí registrada por el receptor. Dependiendo de la equivocación y el ruido, la información mutua toma la siguiente forma:

$$H(X : Y) = H(X) - E = H(Y) - N \quad (8.10)$$

Por su definición en términos de la entropía condicionada, tanto E como N no sólo dependen de la fuente y del receptor sino de la distribución de probabilidad condicionada.

Como vimos, la entropía de Shannon es el único funcional que cumple las condiciones dictadas por colección de axiomas [ver B], por eso es la única medida de compresión de una fuente. De la misma manera, la información mutua es la única medida de dependencia entre distribuciones de probabilidad que cumple dichas restricciones [Shannon y Waver, 1949, p. 86]. Por eso la información mutua también es un concepto métrico distinto a la información de Fisher. Se puede apreciar de manera intuitiva si se piensa que la información mutua de una variable aleatoria respecto a sí misma es la entropía de Shannon. Esto es, $I(X : X) = H(X) - H(X|X) = H(X)$ o lo que es igual, si el ruido y la equivocación se anulan, la información muta y la entropía de Shannon son iguales.

De manera más general, si calculamos la información mutua con respecto al parámetro θ y para los datos observados $\{y_1, y_2, \dots, y_n\} = \vec{y}$, entonces $I(\theta, \vec{y}) \neq \mathcal{F}(\theta|\vec{y})$ es distinta a

³²⁹ Si la probabilidad de obtener $X = x_i$ en el primer experimento depende de obtener $Y = y_j$, esto significa que el espacio muestral se reduce a aquellos x_i condicionados por la ocurrencia del elemento y_j . Se puede definir la probabilidad condicionada, que cumpliría los axiomas de Kolmogorov - en particular, la independencia entre las dos distribuciones de probabilidad $p(x|y) = p(x_i)$, que implica $p(y|x) = p(y_j)$ si $p(x_i) > 0$ y $p(y_j) > 0$ - como:

$$p(x|y) := \frac{p(x_i, y_j)}{p(y_j)} \quad (8.7)$$

Donde se ha considerado el experimento sobre el espacio muestral Ω , en el que la variable aleatoria $X \otimes Y$ toma valores según la distribución de probabilidad conjunta $P(X = x_i, Y = y_j)$ sobre el conjunto $P(X) \otimes Q(Y)$.

Si fijamos un elemento de $Y = y_i$, la probabilidad condicionada $p(x|y)$ es una distribución de probabilidad a la que se puede asociar la entropía condicionada:

$$H(X|Y) = - \sum_{i,j} p(x_i|y_j) \log_2 p(x_i|y_j) \quad (8.8)$$

Si las variables son independientes $H(X|Y) \leq H(X)$, la incertidumbre en caso de que exista una restricción es menor que cuando no existe.

la información de Fisher aunque en casos particulares podría constituir una cierta cota a la información mutua [Brunel y Nadal, 1998, 6-8] o [Huang y Zhang, 2019].

Las discrepancias sobre el significado entre los conceptos métricos de información de Fisher y de Shannon, que acabamos de presentar, aumentan cuando se comparan con los términos correspondientes en el ámbito cuántico. Baste observar que la entropía mutua cuántica puede tomar valores negativos, puesto que la entropía de von Neumann del estado compuesto puede ser menor que la de uno de sus componentes³³⁰. Estos resultados son consecuencia de la propiedad exclusivamente cuántica del entrelazamiento, que puede medirse mediante la entropía de von Neumann, objetivo que no cumple la información de Fisher.

Además, el concepto de entropía condicional cuántica, mediante el que se define la entropía mutua cuántica, presenta dificultades interpretativas puesto que las probabilidades condicionales de las que depende son cuánticas y esto significa fijar un estado y esto es problemático en caso de que los sean incompatibles [Guerra, 2013, p. 126-128].

Si en general los conceptos métricos son tan claramente diferentes surge preguntarse por el origen de la confusión entre los dos conceptos de información. Pensamos que el problema está en la interpretación.

En efecto, desde un punto de vista, la información muta $I(X : Y)$ se suele considerar como la cantidad de información -clásica o cuántica- en el sentido técnico producida por la fuente que alcanza el destino o fluye por el canal. Pero estamos de acuerdo con Timpson [2013, p. 36 y ss.] en que esta interpretación no es adecuada. La fuente produce la secuencia, no la información sobre la secuencia. Si el canal es indefectiblemente ruidoso puede ser que nada de lo producido se transmita. Timpson sostiene que el término información es un nombre abstracto. Se adhiere a la caracterización de C.S. Pierce entre tipos (*type*) y símbolos concretos (*tokens*). La información sería el tipo que puede ser realizado en distintos símbolos concretos (madera, ondas electromagnéticas, etc.).

Por eso no parece adecuado afirmar que la información técnica en el sentido de Shannon se comporte como una sustancia pues se caracteriza en el marco de una situación de comunicación en su totalidad o, simplemente, se define como un funcional dependiente de las distribuciones de probabilidad. En este sentido, la información mutua dependería de dos distribuciones de probabilidad.

Por las razones aducidas, no parece propio admitir que la información se “transporte sobre los fotones”. No creemos que pueda entenderse como una propiedad que fluye. En el marco de la teoría de la comunicación - clásica o cuántica- es la manera con la que se caracteriza la compresibilidad de un mensaje emitido por una fuente estacionaria - clásica o cuántica- y ni la compresibilidad ni la capacidad del canal “se transportan” [ib., p.37].

Así pues, debemos concluir que al no compartir dominio - es decir, al no utilizar el

³³⁰ $S(A|E) := S(\hat{\rho}_{AE}) - S(\hat{\rho}_E)$. En general los conceptos cuánticos se aclaran cuando se pone el foco en los teoremas que nos facilitan una interpretación en términos de comunicación como el de Schumacher y el HSM [Nielsen y Chuang, 2009, p. 572].

mismo concepto de información- no es plausible una simulación analógica entre el proceso darwinista biológico modelado mediante la información de Fisher y el Darwinismo Cuántico formulado gracias a la información mutua cuántica y la de Shannon.

Como hemos visto en varios lugares en esta disertación, el concepto de información es polisémico. Depende fuertemente del contexto en el que se aplica. En el ámbito de la comunicación se relaciona con la medida de compresibilidad - $H(X)$ - o la capacidad de un canal - $H(X : Y)$ -, en el sintáctico sería un conjunto de datos ordenados mediante reglas responsables de su “arquitectura”, en el epistémico se relacionaría con conocimiento, en el semántico con el de significado y función en un sistema semiótico, en el físico podría aludir a negentropía, en el biológico tomaría un sentido teleosemántico, etc³³¹.

La interpretación existencial se apoya en un concepto epistémico de información y no en el puramente sintáctico de la formulación del Darwinismo Cuántico. Ésta es una posible razón de la tensión que surge entre las características ónticas y epistémicas que Zurek adscribe al estado cuántico.

Del mismo modo, la analogía con el darwinismo biológico no es capaz de fortalecer esta interpretación de la teoría cuántica primero porque la dinámica de la selección natural darwiniana no es la propia de una medida cuántica. Además, la información de Fisher y la de Shannon o la de von Neumann, son conceptos métricos distintos diseñados para situaciones empíricas distintas³³².

Por tanto, parece evidente que el ascenso semántico del término “información” desde el nivel material del lenguaje introduce distorsiones y problemas en la interpretación existencial.

Desde un punto de vista ontológico, si caracterizamos el término información como “[...] una distinción que crea una diferencia”³³³, la ruptura de la uniformidad se puede reducir a datos definidos a través de una relación³³⁴. Ésta no implicaría necesariamente una implementación material, pues los datos como distinción pueden ser (1) entidades de *re*, (2) de dicto -símbolos- y (3) fenómenos -señales- [id.]. En el primer caso, la distinción es previa a la interpretación, los datos serían privación de uniformidad o “ fracturas en la fábrica del ser ” [Floridi, 2010, p.85]. En el segundo caso, la ruptura de uniformidad se establece a nivel simbólico, como por ejemplo en el caso de las flechas \uparrow y \downarrow . Por último, en tercer supuesto, es relativa a la percepción de una señal como el ruido y el silencio.

Bajo este punto de vista el concepto de información mantiene la neutralidad ontológica. Esto quiere decir que su interpretación depende del compromiso ontológico que adoptemos sobre la naturaleza de la realidad³³⁵.

³³¹ Consultar resumen y esquemas conceptual en [Floridi, 2010, p.2].

³³² En el caso cuántico, se ha formulado un análogo a la información de Fisher mediante la métrica de Fubini-Study. Ver, por ejemplo, Facci et al. [2010].

³³³ apud. [Floridi, 2010, p.85].

³³⁴ Dato: “x es distinto de y donde x e y son dos variables no interpretadas y el dominio queda abierto a posteriores interpretaciones” [id.].

³³⁵ Según Floridi [op.cit. pp.90-91], la representación puede establecerse mediante relata no materiales -e.g. las mónadas de Leibniz- sobre los que se sustenta la experiencia material. También las propias relaciones se

Parece evidente que siguiendo el lema “it from bit”, el Darwinismo Cuántico se compromete con un tipo de entidad y de dinámica inmaterial. No es más que una variante del denominado darwinismo universal de procesos, para el que todo cambio en la naturaleza se puede reducir a un algoritmo de tipo darwinista que procesa información.

Esta conclusión parece reforzarse por la afirmación, no menos sugerente, que plantea Zurek al preguntarse si el Darwinismo Cuántico no será más bien “[...] un proceso de multiplicación de información sobre ciertos estados favorecidos que parece ser un «hecho de la vida cuántica»”[2009, p.9] y no estará “de alguna manera detrás de la selección natural familiar”[*id.*]. En este último capítulo hemos demostrado que el Darwinismo Cuántico junto a la interpretación existencial fracasan en su intención de sostener una metafísica darwinista.

En definitiva, eslóganes como “it from bit”, “no hay información sin representación” [ib., 25] y “la información es física” [Landauer, 1991, pp. 23-29], propios de disciplinas como la física³³⁶ y la computación cuántica³³⁷, no siempre representan una buena ayuda a la hora de esclarecer problemas interpretativos. A veces, como en el caso de la disputa sobre la naturaleza analógica o digital de la información³³⁸, no son más que los viejos problemas filosóficos en odres nuevos.

pueden constituir bajo marcos noéticos, en los que es lo mismo el pensar que el ser -e.g. Berkley, Spinoza

³³⁶Consultar el caso de la física en el apéndice B.

³³⁷Ver por ejemplo, Landauer y Bennett 1985, Landauer [1991] y, en nuestro caso, [Zurek, 2008].

³³⁸Esta es una versión actualizada del problema del continuo. Como es conocido, esta cuestión se encuentra asociada desde la antigüedad a una larga controversia filosófica cuyas huellas se pueden encontrar en las aporías de Zenon, las respuestas de Aristóteles, el principio de continuidad en Leibniz, la segunda antinomia de Kant, etc.

Conclusiones

En el último capítulo de la disertación, hemos estudiado y evaluado la analogía del Darwinismo Cuántico y su papel en la interpretación existencial de la teoría cuántica.

Al analizar la fuente de la analogía, concluimos que, según la literatura consultada, la explicación descriptiva de la estructura causal del darwinismo de Darwin podía clasificarse en cinco tipos. Además, distinguimos entre selección natural como proceso creativo y también en sentido negativo, es decir, como simple criba.

Desde el punto de vista explicativo, diferenciamos el principio de selección natural sincrónico (PSN) y el diacrónico (TSN). Estos corresponden respectivamente a dos tipos de *explananda*: el primero centrado en explicar la dinámica de los rasgos de individuos y poblaciones en un solo paso y el segundo a lo largo de una secuencia iterativa.

En primer lugar, descartamos entender la analogía del Darwinismo Cuántico como pura “reproducción diferencial” puesto que confundía agencia con contabilidad, pudiendo convertirse el argumento en circular.

Posteriormente, establecimos la analogía darwinista para resolver el problema de la medida de la teoría cuántica y encontramos que una iteración del proceso cuántico análoga a la propuesta por la TSN impedía la persistencia de los estados cuánticos y, por tanto, la transformación de sus propiedades a las propias de los estados clásicos. De ahí se concluye que la analogía negativa del objetivo pertenece a la asociación previa de la hipótesis fuente, lo que arruina la plausibilidad de la analogía del Darwinismo Cuántico.

Apuntamos también que si la fuente es el principio de selección natural negativo, la criba o filtro en dos pasos puede constituir una analogía plausible al Darwinismo Cuántico como proceso de selección mediante un tamiz de predictibilidad seguido por la replicación diferencial en el entorno.

Así mismo, exploramos las distintas opciones para poder establecer un isomorfismo sintáctico entre los modelos de evolución darwinistas y el Darwinismo Cuántico. Concluimos que dicha analogía no es plausible porque los dos procesos, la ecuación maestra y la ecuación de Price, se representan mediante estructuras matemáticas distintas, la primera es una ecuación diferencial en derivadas parciales y la segunda es una identidad que puede transformarse para cada modelo en una ecuación no lineal de primer orden.

Posteriormente comparamos las expresiones en la formulación asociada al concepto de información. Defendimos que aunque se pudiera dar algún caso particular de simulación

análoga, la plausibilidad se vería fatalmente anulada porque los conceptos métricos de información en los dos dominios, la información de Fisher, por un lado, y la de Shannon y von Neumann, por otro, son distintos. La primera se considera una medida local y las otras dos son globales. Además, en el caso cuántico la entropía de von Neumann mide el grado de entrelazamiento, función que no cumple la de Fisher. Esto implica que no hay una base común desde la que establecer la analogía.

Todos estos argumentos indican que las dinámicas derivadas de los modelos de simulación entre las distintas distribuciones de probabilidad inicial y final muestran la implausibilidad de una inferencia mediante analogía entre el darwinismo biológico y el cuántico.

Es más, planteamos que el ascenso semántico desde el ámbito material apoyado en el concepto polisémico de información crea confusión en torno a la naturaleza de los estados cuánticos porque confunde el concepto epistémico de información con el sintáctico y el físico. Dicho de otra manera, no es lo mismo la información como conocimiento que como medida de compresión o como negentropía. Además, aclaramos que el uso de la expresión “transferencia de información” en el sentido de flujo de una propiedad transportada por entidades como los fotones es completamente inadecuado.

Este ascenso semántico inapropiado inhabilita a la interpretación existencial, resumida en el lema “it from bit”, para conectar el formalismo de la teoría cuántica con la experiencia cotidiana y arrastra al Darwinismo Cuántico a un monismo metafísico de corte inmaterialista. Es decir, la metafísica darwinista sostendría que todo se reduce a un proceso abstracto de selección natural.

No obstante, consideramos que el Darwinismo Cuántico ha desempeñado una función heurística importante en la continuidad del programa de decoherencia. Además, en esta tesis demostramos que constituye una buena metáfora o *catacresis* cuyo propósito es organizar el nuevo campo de investigación de los sistemas cuánticos abiertos.

Parte V

CONCLUSIONES GENERALES

Una larga argumentación

Si se nos permite parafrasear a Darwin [1859, p. 459], como este trabajo presenta una larga argumentación, puede ser conveniente recapitular de manera sucinta los principales resultados y conclusiones.

Como adelantamos en la introducción, las tres nociones principales sobre las que gravita esta tesis son: el problema de la interpretación de la mecánica cuántica, la teoría de la información y la teoría de la evolución por selección natural de Darwin.

La estrategia metodológica que despliega el programa de investigación del Darwinismo Cuántico para explicar la transición entre el mundo cuántico y la experiencia ordinaria se caracteriza por el uso analógico del proceso de selección natural. Desde un punto de vista formal, la plausibilidad de la extensión de la analogía del ámbito de la biología al de la física se apoya sobre la posibilidad de reducir ambos procesos, el de selección natural y el de la medida cuántica, a un proceso de transferencia de información entre los sistemas y el entorno.

Con objeto de evaluar la bondad de tal analogía bajo distintos enfoques, dedicamos la primera parte de este trabajo a: (1) clarificar el concepto de “darwinismo” en biología evolutiva, (2) fijar la estructura del proceso darwinista y (3) ofrecer dos versiones abstractas de él, una de las cuales es su traducción formal al lenguaje de la información.

Con respecto al primer objetivo, llegamos a la conclusión (cap.1) de que el término “darwinismo” muestra un uso controvertido en la literatura, entre otras razones, debido a que las teorías son entidades históricas. Argumentamos que los debates actuales sobre el darwinismo hunden sus raíces hasta los diferentes grados de maduración de las ideas sobre el cambio biológico que sustentó el propio Darwin. Por esta razón, después del estudio pormenorizado de las fuentes y bajo el punto de vista de una corriente importante de la historiografía, propusimos una posible clasificación del “darwinismo de Darwin” en cinco grupos o hipótesis evolutivas distintas: el darwinismo de Darwin (1) es saltacionista; el (2) defiende que una de las razones de la transmutación de las especies es fruto de la selección natural negativa cuando las condiciones externas varían; el (3) introduce un cambio en el concepto de selección natural al considerar la lucha por la existencia interespecífica, análoga al modelo maltusiano; el (4) extiende el concepto de selección natural al caso en que la competencia sea intraespecífica - esto significa que la adaptación del individuo se convierte en relativa y, por lo tanto, la selección natural no deja de operar aunque no cambien las

condiciones externas - ; finalmente, el (5) se abre decididamente al pluralismo ontológico tanto de la unidad de selección como del tipo de proceso responsable del cambio, lo que implica una ligera disminución en el papel principal director de la selección natural como motor de la evolución.

En lo que se refiere al segundo objetivo, defendimos que la explicación darwinista se puede acomodar a una descripción de una cadena causal bajo una estructura hipotético deductiva con extensión inductiva de tal suerte que el proceso de selección natural propuesto por Darwin en las versiones (4) y (5) era esencialmente creativo. Identificamos dos tipos de *explananda* en la explicación: el principio de selección natural sincrónico (PSN) - éste daba cuenta del cambio de rasgo entre dos poblaciones consecutivas, la composición de una población en un momento particular y la existencia de un tipo concreto de individuo - y la evolución por selección natural de carácter diacrónico (TSN), como iteración a lo largo de una inmensa escala temporal, que explicaría el origen de los rasgos de una población y de un individuo en particular.

Por último, nuestro tercer objetivo para fijar la naturaleza de la fuente de la analogía darwinista nos llevó a considerar la extensión del proceso darwinista al nuevo enfoque estadístico procedente del estudio evolutivo de la genética de poblaciones. Gracias a esta disciplina, fuimos capaces de encontrar dos expresiones matemáticas que representan dos modelos abstractos de la teoría genética de la selección natural: la ecuación de Price en términos de covariancia y en función de la información de Fisher. Estas dos expresiones no sólo facilitan la evaluación formal de la analogía, también suponen una nueva estrategia de tipo metodológico con implicaciones epistémicas importantes: al tomar un punto de vista estadístico, que separa las nociones de agencia y contabilidad, queda en un segundo plano la explicación causal del origen del cambio. Esto significa, en cierta manera, la disolución de la controversia sobre la creatividad del proceso de selección natural pues queda reducido a mera contabilidad.

Una vez definida la fuente de la analogía, presentamos el problema principal que el programa de Darwinismo Cuántico intenta resolver, a saber: el problema de la medida de la mecánica cuántica (parte II, cap.3) . En esencia, este problema se deriva de la inconsistencia entre la evolución lineal sostenida por el formalismo de la teoría y la evidencia empírica de que el resultado de las medidas es único y está bien definido.

Guiados por la teoría de la ciencia y el programa de decoherencia (cap.4), ofrecimos una versión del problema que separa de manera nítida el formalismo de su interpretación. Al primero corresponden los principios de completud de la función de onda, evolución lineal y composición de sistemas. A la interpretación pertenece el principio de repetibilidad bajo el que se presenta un algoritmo que conecta la teoría con las observaciones: el colapso o reducción de la función de ondas y la regla de Born para calcular las probabilidades de los resultados.

La estrategia seguida por el programa de decoherencia física para resolver el problema mencionado consiste en introducir en el algoritmo de la interpretación la consideración

de que el sistema no puede aislarse totalmente del ambiente en el proceso de medida. Esto implica que los tres principios del formalismo se deben extender también al entorno. Debido a la complejidad de éste, las superposiciones cuánticas, el entrelazamiento, derivadas de la interacción del sistema con el ambiente, producen una deslocalización de las fases en los múltiples grados de libertad del entorno lo que conlleva una caída de los términos de interferencia. En definitiva, una pérdida aparente de la linealidad dinámica. La ecuación maestra es la operación matemática de “grano grueso” que representa la evolución de los estados desde el “frágil mundo cuántico” al “mundo clásico robusto”. Con otras palabras, es la operación matemática que implementa la denominada transición cuántico-clásico.

Ahora bien, el resultado de la decoherencia puede explicar la caída de las interferencias cuánticas aunque esto no significa: (1) que no sigan presentes, (2) que sean inaccesibles y (3) que puedan volver a reaparecer. No obstante, parece que hay un relativo consenso entre los académicos en que la decoherencia resuelve el problema pequeño de la medida, a saber: el problema ontológico - la posibilidad de asignación de propiedades - y explica la dificultad para observar las interferencias cuánticas en nuestra experiencia ordinaria. No obstante, el mecanismo de decoherencia no resuelve el problema de los resultados.

Así pues, el programa de decoherencia ha investigado los efectos sobre el sistema causados por la interacción con el entorno, pero es incapaz de explicar por qué se obtiene un sólo resultado tras la medida. Para afrontar esta cuestión, el Darwinismo Cuántico pretende estudiar el efecto sobre el entorno que ha causado la interacción con el sistema. En pocas palabras, intenta descubrir el rastro de información que el sistema dejó en los fragmentos del entorno (parte III, cap.5).

La estructura argumental del programa que lidera Zurek puede resumirse de la siguiente manera: (1) en el sistema global cerrado se establece la partición entre el sistema, entorno y observador; la interacción produce el entrelazamiento cuántico de estos tres subsistemas debido a la dinámica lineal y, resultado de la complejidad del entorno, pueden ocurrir dos procesos: la deslocalización de los términos de fase y la caída de las interferencias, decoherencia (2), y la selección inducida de los estados puntero (3), candidatos a representar el “dominio clásico”. Es importante resaltar que estos dos procesos son independientes. El último, el proceso de selección de los estados candidatos a clásicos, puede representarse matemáticamente mediante dos operaciones: (a) encontrar un operador, la representación matemática de la propiedad, que conmute con el hamiltoniano que especifica la dinámica del sistema completo o (b) someter a los distintos candidatos a estados clásicos al “tamiz de predictibilidad” mediante el cálculo de la entropía de von Neumann sobre el estado puro del sistema o el cálculo de traza sobre su cuadrado. Estas operaciones mostrarán cuál de los vectores u operadores densidad puros, que representan el estado del sistema, queda menos perturbado tras la interacción con el entorno.

Ahora es cuando interviene el proceso de Darwinismo Cuántico en sentido restringido (4): la estabilidad de los estados puntero a la interacción con el ambiente les permite correlacionarse cuánticamente con distintas fracciones de éste de manera que puede ser

fácilmente descubiertos por el observador. Descifrar cómo se revelan al observador los estados puntero queda a cargo de alguna nueva suposición interpretativa para conectar el formalismo con los resultados empíricos.

Todo el proceso anteriormente descrito, el Darwinismo Cuántico en sentido amplio, puede ser representado en términos de transferencia de información entre sistema, entorno y observador. Esto facilita la incorporación de la denominada interpretación existencial a la resolución del problema de la medida (cap.6).

En efecto, bajo criterio operacional de realidad -basada en la intersubjetividad y el consenso- se asigna existencia objetiva de manera relativa a aquellos estados que más información dejan en el entorno y, por tanto, pueden establecer más correlaciones con los estados de memoria de los observadores. En definitiva, la existencia se basaría en la persistencia darwiniana.

El problema que encontramos es que, en el caso de la interpretación existencial, ese proceso de transferencia de información, el denominado “it from bit”, sería epistémico y no óptico. Además, no correspondería con el carácter sintáctico y físico del proceso de Darwinismo Cuántico. Finalmente, llegamos a la conclusión de que Zurek no es capaz de encontrar una solución realista debido a que no suscribe compromisos ontológicos y éstos no se pueden derivar exclusivamente del formalismo. Por esta razón, pensamos que la interpretación existencial no es más que un intento de renovación de la interpretación de Copenhague a la que se ha incorporado un nuevo enfoque pragmatista ampliamente influido por la epistemología darwinista.

Sea como fuere, han quedado establecidos en los párrafos anteriores la fuente, el objetivo de la analogía y el problema que pretenden resolver. El objetivo final de esta tesis se sustancia en la parte IV de este trabajo y consiste en: la evaluación de la plausibilidad de una hipotética analogía entre el proceso de selección natural darwiniano y el Darwinismo Cuántico, la función que esta analogía cumple en la interpretación existencial y el papel que juega el concepto de información.

Abrimos la cuarta parte con el capítulo séptimo dedicado a esclarecer los conceptos de analogía, metáfora y argumento analógico. Centramos nuestro estudio sobre la perspectiva lógica y concluimos que el argumento analógico es un argumento por semejanza de relaciones entre los términos fuente y objetivo. Derivado de su utilización en las ciencias experimentales, no exigimos que la relación fuera de estricta isomorfía y destacamos que dicho argumento dependía fuertemente del contexto. Esta última propiedad podría utilizarse como método de demarcación entre metáfora y analogía.

Tras presentar la estructura del argumento analógico y las estrategias de evaluación de la plausibilidad de la analogía, decidimos seguir el modelo de articulación de Paul Bartha en el que la analogía del Darwinismo Cuántico se considera explicativa abductiva de tipo probabilístico.

Una vez puesto en claro el método a utilizar, empezamos el capítulo final de la tesis (cap. 8) analizando el carácter metafórico del darwinismo aplicado a la teoría cuántica. Llegamos

al convencimiento de que se podía entender el Darwinismo Cuántico como una *catacresis* en el sentido de que este concepto podría tener la función de ordenar y definir un nuevo campo de estudio, el dedicado a la investigación del “corte de Heisenberg” y el relacionado con las operaciones propias del mundo de la información y la computación cuántica.

Tras la evaluación del carácter metafórico, emprendimos el estudio de la analogía desde el punto de vista formal. Diferenciamos entre el Darwinismo Cuántico en sentido amplio y en sentido restringido. En el último caso, la analogía se referiría a la mera multiplicación o correlación masiva. Defendimos que, tal y como lo concebimos en la primera parte del trabajo, el proceso de selección natural no puede considerarse exclusivamente como “reproducción masiva”, pues el éxito se podría derivar de otras causas como la deriva.

Concentrados en la analogía darwinista en sentido amplio, desplegamos un análisis conceptual para establecer las relaciones que deberían mostrar semejanza entre la fuente, el darwinismo de Darwin, y el objetivo, el Darwinismo Cuántico. Identificamos tal estructura de relaciones gracias a que pudimos acomodar el argumento del Darwinismo Cuántico al esquema del proceso hipotético-deductivo darwinista desarrollado en la primera parte. Tras presentar los distintos tipos de analogías - positiva, negativa y neutra -, los factores críticos y las condiciones auxiliares, concluimos que: (1) la iteración del principio de selección natural (PSN) no conduciría al resultado obtenido en el Darwinismo Cuántico pues el canal se convertiría en ruidoso y sería imposible encontrar los estados puntero, por tanto, no es análogo al darwinismo entendido como proceso que conduce a la evolución gradual por selección natural (TSN); (2) podría considerarse que el Darwinismo Cuántico es análogo al principio de selección natural negativo - como siega o filtro en un sólo paso - según se admite en los tipos de darwinismo (2) y (3). Por último, no sería plausible la analogía del Darwinismo Cuántico con el PSN de los tipos de darwinismo (4) y (5) porque el resultado final del proceso cuántico es la estabilidad, al contrario que en el caso biológico en el que la adaptación no es perfecta sino relativa.

En la última sección de la tesis, estudiamos la plausibilidad de la analogía matemática. En primer lugar, descartamos la posibilidad de considerar los dos tipos de darwinismo, el representado por la ecuación de Price y el representado por la ecuación maestra, como isomorfismo sintáctico puesto que son dos estructuras matemáticas distintas - una ecuación de segundo grado en derivadas parciales y una identidad matemática-.

Por último, suponiendo que las dos estructuras de la fuente y el objetivo fueran marcos de modelización que describen el proceso de transferencia de la información como modelos de datos, analizamos la plausibilidad de que las dos expresiones que representan la dinámica evolutiva de los sistemas biológico y cuántico fueran análogas. Concluimos que los términos de información de Shannon, información mutua cuántica e información de Fisher son conceptos métricos distintos, adecuados a la medida en marcos materiales diferentes. En concreto, la información de Fisher es una medida local de información sintáctica, muy sensible a una reordenación de los datos, lo que la convierte en una excelente herramienta para calcular la relación entre poblaciones ordenadas. Por contra, la información de Shannon

es una medida global insensible a reordenamientos de datos al igual que el concepto de información mutua que mide la dependencia entre dos distribuciones de probabilidad. En el caso de los conceptos cuánticos de información, se agrava esta diferencia de carácter métrico debido a la propiedad cuántica del entrelazamiento.

Como adelantábamos en el resumen, concluimos que el Darwinsimo Cuántico es una metáfora (*catacrexis*) que sirve para investigar un nuevo campo de investigación, además de desplegar una función heurística y retórica dentro de una orientación pragmatista de la interpretación de la mecánica cuántica. Además, sostenemos que la interpretación existencial no es capaz de conectar el formalismo cuántico con la experiencia ordinaria pues no se puede entender la transición del “bit” al “it” como un proceso de selección natural, ni siquiera desde el punto de vista formal.

Al centrar su discurso en el término “información”, el programa de investigación del Darwinismo Cuántico ha dejado atrás el modo material del lenguaje. Este ascenso semántico inapropiado es el responsable de la confusión interpretativa. En efecto, el concepto de información como ruptura de la uniformidad mantiene la neutralidad ontológica. No obstante, la interpretación existencial se compromete con el concepto epistémico de información, mientras que el proceso de “transferencia de la información” en el Darwinismo Cuántico es sintáctico y, en última instancia físico. Éste es el origen de la posible tensión entre la naturaleza óptica y epistémica que surge en la interpretación de los estados cuánticos.

En definitiva, como hemos demostrado, el programa de Darwinismo Cuántico con la interpretación existencial fracasan al sostener que la realidad se podría reducir a una dinámica darwinista de tipo inmaterial. Sin duda, esto constituye un verdadero obstáculo para quienes sostienen una metafísica darwinista, pues este programa no demuestra que la realidad se pueda reducir ontológicamente a un proceso de selección natural entendido como un conjunto de algoritmos que procesan información.

APÉNDICE

Apéndice A

El Formalismo de la Mecánica Cuántica.

Desde los trabajos pioneros de J. von Neumann [1932] y de P.A.M. Dirac [Dirac, 1958], se conoce la estructura matemática³³⁹ de la mecánica cuántica. En esencia, los fundamentos matemáticos de la teoría cuántica descansan en el álgebra de operadores en espacios de Hilbert, conocidas como álgebras de Von Neumann. Como es bien conocido, no hay unicidad de criterios a la hora de presentar los postulados de la mecánica cuántica, pues algunos programas formalistas pretenden alcanzar un conjunto mínimo de axiomas y otros están orientados a dotar a la axiomática de sentido físico.

Enunciamos los postulados tanto para estados puros como para estados mezcla y consideramos también el caso más general dentro de la corriente operacionalista en la que se ha venido a llamar la interpretación mínima de la teoría cuántica. Se sigue en esencia el texto clásico de [Dirac, 1958] y el riguroso tratamiento matemático de [Galindo y Pascual, 1989]. Se ha creído conveniente tomar los ejemplos de los sistemas cuánticos más sencillos procedentes de la computación cuántica no sólo por motivos exclusivamente pedagógicos [Nielsen y Chuang, 2000], sino porque una buena parte de la literatura sobre fundamentos, tanto teórica como experimental, aborda los problemas orientada por la teoría de la información cuántica.

³³⁹Actualmente se considera que la base matemática de la mecánica cuántica descansa en la estructura de los observables de las C^* -álgebras donde los estados son funcionales lineales positivos y se puede establecer la isomorfía isométrica entre las C^* -álgebras de los operadores acotados en espacios de Hilbert [Strocchi, 2005].

A.1. Estados puros

A.1.1. Postulado 1.- Completud de $|\Psi\rangle_R$.

A todo sistema físico le corresponde una representación matemática en un espacio de Hilbert \mathcal{H} complejo y separable. A cada estado del sistema del que tenemos la máxima información o puro³⁴⁰ se le asocia un rayo unidad $|\Psi\rangle_R$ ³⁴¹ cuyos elementos se denominan vectores de estado.

La consecuencia más importante del postulado de completitud es el *principio de superposición*: cualquier superposición lineal de vectores de estado puros, que pertenecen a un espacio de Hilbert \mathcal{H} , es también estado puro del sistema bajo ciertas condiciones generales³⁴². Así pues el principio de superposición es inherente a la estructura del espacio de Hilbert .

La formulación general del principio de superposición para n estados es:

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle \quad (\text{A.1})$$

donde las amplitudes de probabilidad compleja c_n obedecen la condición de normalización $\sum_n |c_n|^2 = 1$. Es preciso hacer resaltar que la superposición cuántica no es una mera suma de estados -una distribución estadística- sino que representa un estado físico de un sistema individual: todas las componentes de la superposición se encuentran presentes a la vez. Con otras palabras:

1. La indeterminación del estado de superposición no se debe caracterizar como ignorancia del estado sino que debe ser entendida como objetiva, pues es característica de un sistema cuántico y no de un conjunto estadístico.
2. No podemos interpretar el estado de superposición al modo de las ondas clásicas, donde cada una de las ondas de la superposición tienen localizaciones diferentes. El estado de superposición es un estado sin análogo clásico, con componentes $|\psi_n\rangle$, cuya característica diferenciadora cuántica reside en la coherencia o capacidad de que se interfieran las distintas componentes del estado superposición (autointerferencia).

[Gerlach y Stern, 1922] encontraron la primera evidencia experimental directa de la cuantización espacial y, por lo tanto, del principio de superposición. Otros experimentos,

³⁴⁰Como veremos, si se ha fijado un conjunto completo de observables que conmutan, es decir que son compatibles y por lo tanto su conjunto de autovectores forma base ortonormal única salvo fase, entonces se dice que se tiene máxima información del sistema o estado puro.

³⁴¹Los posibles estados del sistema son una clase de equivalencia de vectores normalizados bajo transformaciones de fase.

³⁴²Si no existen reglas de superselección que limiten la validez de este principio [Galindo y Pascual, 1989, p. 121], cualquier vector normalizado de estado de un espacio de Hilbert representa un estado puro del sistema.

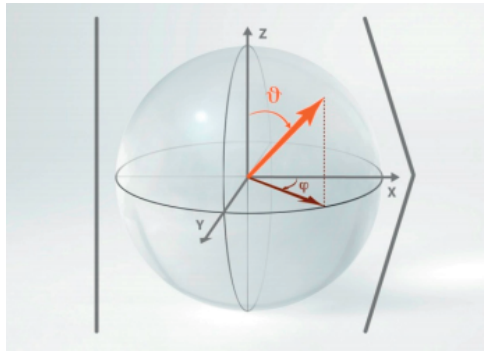


Figura A.1: El cubit como estado cuántico bicomponente representado en un *bra*. Imagen tomada de [Dür y Heusler, 2013]

ya sean de variación espacial -como la famosa doble rendija- o temporal- Interferometría Ramsey- evidencian de forma indirecta la superposición.

Estos experimentos de interferencias parecían estar circunscritos al microcosmos, pero gracias a las interferencias conseguidas con fullereno (C_{60}) [Ardnt et al., 1999], actualmente la frontera de aplicación del principio de superposición no parece estar limitado por la escala del sistema sino por la capacidad de aislar los sistemas de su interacción con el entorno.

El ejemplo más sencillo de formulación matemática del principio de superposición, que nos servirá para introducir la notación habitual en teoría de la información cuántica necesaria para el resto del trabajo, es el del *cubit* (bit cuántico).

Los estados clásicos diferenciados más simples que se utilizan en teoría de la información son el estado 0 - apagado, “no”, ...- y el estado 1 - encendido, “sí”, ...-. El bit es un sistema que puede tomar dos estados clásicos distintos³⁴³.

La extensión natural de esta idea para un sistema cuántico es el cubit -*bit cuántico*- que es la representación de un sistema cuántico superposición de dos estados con diferentes realizaciones físicas como los dos estados de espín, dos estados de polarización del fotón, dos niveles distintos de excitación atómica, etc.:

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \quad (A.2)$$

donde a y b son números complejos conocidos como amplitudes de probabilidad de los estados ortogonales $|0\rangle$ y $|1\rangle$ respectivamente que forman la denominada base de computación $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ tal que su producto escalar $\langle 1|0\rangle = 0$. El nuevo estado $|\psi\rangle$ debe cumplir la consiguiente condición de normalización $\langle \psi|\psi\rangle = 1$, equivalente a imponer $|a|^2 + |b|^2 = 1$.

La esfera de Bloch (fig.A.1) es la representación tridimensional más intuitiva del cubit y, por tanto, del estado bidimensional de superposición. Se representa mediante la ecuación $|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$. El cubit depende de dos parámetros: θ , que nos da la

³⁴³En los textos de computación, suelen definirlo como la cantidad de información que se obtiene al encontrar uno de los dos estados, siendo éstos igualmente probables.

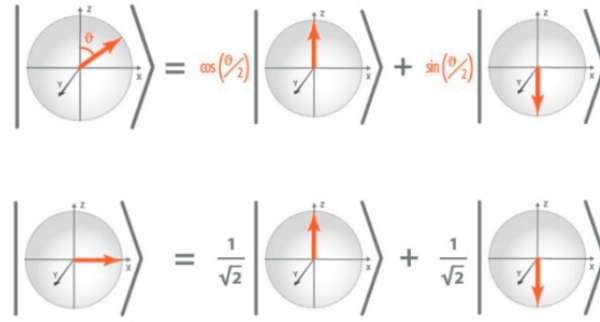


Figura A.2: Descomposición de cubits en la base estándar $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Imagen tomada de [Dür y Heusler, 2013]

contribución relativa de las componentes $|0\rangle$ y $|1\rangle$ y ϕ , que nos informa sobre la fase relativa entre esas componentes.

La superficie de una esfera de Bloch contiene tantos estados puros como puntos en la superficie: cada diámetro de la esfera representa una base de estados ortogonales como $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ ³⁴⁴, etc. Aunque de forma intuitiva parezca que la información del estado de superposición accesible es infinita, lo cierto es que, como para obtener esa información necesitamos medir el sistema, el acceso a la información queda limitado. No obstante, en ausencia de medida, los procesos cuánticos explotan esos recursos de información ocultos a la inspección clásica.

El estado cuántico representado por un cubit se puede preparar. Es decir, podemos determinar el estado de un sistema mediante la operación local denominada preparación. Es una forma de filtrar los estados para que luego se puedan utilizar con el conocimiento del estado del sistema teórico previo. Para preparar un estado debemos dar la lista de instrucciones que seguimos en el laboratorio. Por ejemplo, en el caso de los fotones, si utilizamos el estado de polarización $|\psi\rangle$, podemos especificar su orientación vertical $|\uparrow\rangle$ si colocamos un polarizador vertical. De igual forma, se puede especificar su polarización horizontal $|\rightarrow\rangle$ colocando un polarizador horizontal.

Como es bien sabido por aquellos que se dedican al control cuántico individualizado y a la computación cuántica, hay diferencias importantes entre los estados clásicos y los estados cuánticos:

1. El cubit cumple el principio de superposición cuántico. La superposición es un concepto relativo pues se puede expresar en distintas bases. Como hemos señalado más arriba, las superposiciones cuánticas se deben distinguir de las clásicas. Todas las componentes de la superposición están presentes a la vez en el caso cuántico y no sólo los estados de la base.
2. Los cubits son extremadamente frágiles: la medida o cualquier leve interacción entre

³⁴⁴Por ejemplo, si giramos la base computacional 45° la base será $\{|+\rangle, |-\rangle\}$, donde $|+\rangle = (\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ y $|-\rangle = (\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$.

el sistema y el entorno altera el estado cuántico salvo excepciones³⁴⁵

3. La información potencial de un cubit es mucho mayor que la de un bit, debido a que cumple el principio de superposición. Cuando decimos potencial, queremos diferenciarla de la información accesible, y nos referimos a la información que se debe especificar o preparar que dependerá de la fuente cuántica.
4. La información potencial no tiene por qué ser accesible. Algunos estados en la preparación no son totalmente distinguibles. Estos coinciden con superposiciones de estados no ortogonales.
5. Los estados cuánticos de sistemas multipartitos, por ejemplo de dos electrones, átomos etc, pueden entrelazarse. Esta propiedad será estudiada más adelante pero representa una de las características más destacables de los estados cuánticos. Las correlaciones de las medidas locales de dos sistemas que están físicamente separados no son clásicas, sino cuánticas.
6. No es posible hacer copias exactas de un estado cuántico desconocido. En el caso de los estados clásicos, se pueden hacer las copias que se desee pues las interacciones no tienen por qué cambiar el estado. Así pues, esta propiedad de no clonación es una consecuencia importante derivada de la fragilidad y de la alteración incontrolable de la medida como demostraron [Wootters y Zurek, 1982]. Si se pudieran clonar estados cuánticos desconocidos entonces podríamos hacer copias de ellos suficientes como para medir todas las propiedades del sistema y, por lo tanto, hubiéramos salvado la indeterminación consustancial a la medida. Conoceríamos un estado cuántico desconocido de forma completa.

A.1.2. Postulado 2.- Evolución de estados de sistemas aislados.

La evolución temporal de un estado puro de un sistema físico aislado entre dos medidas consecutivas obedece la dinámica dictada por la ecuación de Schrödinger, que es lineal, unitaria, determinista y continua:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = H(t) |\Psi(t)\rangle \quad (\text{A.3})$$

³⁴⁵ Las interacciones locales entre dos sistemas pueden ser de tres tipos: preparaciones, premedidas - en las que los estados quedan entrelazados- y medidas. Como veremos, en la premedida, el estado del sistema se enreda o entrelaza al estado del aparato y, por tanto, está indefinido en cuanto a las propiedades del sistema aislado -es aquí donde se encuentra la equivalencia entre las representaciones de Heisenberg y de Schrödinger-. Después de una medida no sólo se altera el estado de forma incontrolada sino que en muchos casos la medida de la propiedad lo destruye. El estado del sistema sólo queda inalterado en el caso de que coincida con el autoestado del operador asociado a la propiedad que se desea medir.

donde $H(t)$, el hamiltoniano del sistema físico, viene representado por un operador hermítico que se asocia con la energía salvo para sistemas no conservativos y \hbar es la constante reducida de Planck.

Como la ecuación de Schrödinger es lineal, la evolución del producto escalar $\langle\psi|\psi\rangle = 1$ indica que el vector de estado en un intervalo de tiempo conserva la norma, lo que nos autoriza a escribir:

$$|\psi(t)\rangle = \mathbf{U}(\mathbf{t}, \mathbf{t}_0)|\psi(t_0)\rangle \quad (\text{A.4})$$

El operador \mathbf{U} es unitario³⁴⁶ y cumple la ecuación A.29 y, por consiguiente, su evolución temporal tiene la forma:

$$i\hbar \frac{d}{dt} \mathbf{U}(\mathbf{t}, \mathbf{t}_0) = H(t) \mathbf{U}(\mathbf{t}, \mathbf{t}_0) \quad (\text{A.5})$$

Cuando la hamiltoniana no depende explícitamente del tiempo - sistemas conservativos - el operador unitario \mathbf{U} obedece:

$$\mathbf{U}(\mathbf{t}, \mathbf{t}_0) = e^{\frac{-i(t-t_0)H}{\hbar}} \quad (\text{A.6})$$

$$|\psi(t_0)\rangle \rightarrow |\psi(t)\rangle = \mathbf{U}(\mathbf{t}, \mathbf{t}_0)|\psi(t_0)\rangle = e^{\frac{-i(t-t_0)H}{\hbar}} |\psi(t_0)\rangle \quad (\text{A.7})$$

Hay múltiples ejemplos [Nielsen y Chuang, 2000] de operadores unitarios o puertas cuánticas de dimensión 2x2 que actúan sobre un *cubit*. Las matrices de Pauli son las operaciones más importantes: la matriz identidad \mathbb{I} , la matriz de intercambio de bit o puerta NOT \mathbb{X} , la matriz \mathbb{Y} , la matriz de intercambio de fase \mathbb{Z} :

$$\mathbb{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbb{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbb{Y} = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbb{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

³⁴⁶Un operador unitario es aquel operador cuyo adjunto coincide con su inverso. Estos operadores son importantes en el cambio de bases pues para dos bases ortonormales siempre hay un operador unitario que transforma las coordenadas de una representación a la otra. Los podemos imaginar como operaciones de rotación en la esfera de Bloch. De hecho estos operadores son también importantes para encontrar las simetrías del sistema.

Otro ejemplo relevante es la matriz Hadamard, que transforma la base canónica $[|0\rangle, |1\rangle]$ en la base signo: $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ y $|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$

$$\text{Hadamard}_{\mathbb{H}} : \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 0| + |0\rangle\langle 1| - |1\rangle\langle 1|) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

A.1.3. Postulado 3.- Contenido empírico y regla de Born.

A cada propiedad \mathfrak{P} de un sistema físico, se le asocia un operador líneal autoadjunto³⁴⁷ \hat{A} que actúa en el espacio de estados \mathcal{H} , complejo y separable, del sistema cuántico. Al medir³⁴⁸ el operador hermítico \hat{A} , cuyo conjunto de proyectores espectrales³⁴⁹ $\{\hat{P}_k\}$ satisface

³⁴⁷Recordemos algunas cuestiones importantes de la teoría de operadores en espacios de Hilbert. Todo \hat{A} es autoadjunto si $\hat{A}^* = \hat{A}$. La consecuencia de ser un operador líneal y autoadjunto es que los autovalores son reales $\langle \hat{A}\psi | \psi \rangle = a^* = \langle \psi | \hat{A}\psi \rangle = a \Rightarrow a^* = a \Rightarrow a \in \mathbb{R}$ y que dos autovectores con autovalores distintos son ortogonales $\langle \hat{A}\psi | \xi \rangle = \langle \psi | \hat{A}\xi \rangle \Rightarrow a_1 \langle \psi | \xi \rangle = a_2 \langle \psi | \xi \rangle \Rightarrow \langle \psi | \xi \rangle = 0 \Rightarrow |\psi\rangle \perp |\xi\rangle$. El teorema de descomposición espectral, que se puede consultar en la nota 349, garantiza que a cada operador \hat{A} autoadjunto se le asocia un conjunto de escalares $\{a_1, \dots, a_m\}$ y de operadores proyección $\hat{P}_k = |\psi_k\rangle\langle \psi_k|$ sobre los subespacios ortogonales de \mathcal{H} y que tal descomposición es única, según:

$$\hat{A} = \sum_k^m a_k \hat{P}_k = \sum_i^m a_k |\psi_k\rangle\langle \psi_k| \quad (\text{A.9})$$

Los proyectores cumplen las siguientes propiedades: autoadjunto $\hat{P}_k^\dagger = \hat{P}_k$, idempotente $\hat{P}_k^2 = \hat{P}_k$ y ortogonalidad $\hat{P}_k \hat{P}_l = 0$, $\forall k \neq l$. Para más información ver la nota siguiente o consultar [Galindo y Abellanas, 1991, p. 280-282]. Es importante resaltar que no todo operador autoadjunto representa una propiedad, pues deben tomarse en cuenta las reglas de superselección, ver [Galindo y Pascual, 1989, p. 121].

³⁴⁸Entendemos la medida ideal, sin limitaciones experimentales. Además, como veremos, el marco general de la medida de un sistema cuántico se describe mediante una colección de operadores de medida $\{\hat{M}_k\}$ que cumple la regla de completud $\sum_k \hat{M}_k^\dagger \hat{M}_k = 1$ POVM, en inglés *Positive Operator Value Measurement*. En este apartado nos referimos a medidas proyectivas o PVM, en inglés *Projective Value Measurement*, donde los operadores $\{\hat{M}_k\}$ son mutuamente ortogonales, $\hat{M}_k = \hat{P}_k$, y la medida se simplifica. Ver nota anterior.

³⁴⁹**Teorema 1. Teorema de la descomposición espectral**. En el caso no degenerado: sea la propiedad representada por el operador hermítico \hat{O} con autovalores $\{o_1, \dots, o_m\}$ donde $o_n \in \mathbb{R}$ y sea una colección de proyectores $\{\hat{P}_1, \dots, \hat{P}_m\}$ que proyectan en los subespacios correspondientes mutuamente ortogonales $\{\mathcal{H}_1, \dots, \mathcal{H}_m\}$ de \mathcal{H} obedeciendo la expresión:

$$\hat{O} = \sum_m o_m \hat{P}_m = \sum_m |m\rangle o_m \langle m| \quad (\text{A.10})$$

Este teorema nos conduce a las denominadas medidas proyectivas:

Medidas Proyectivas: Sea un operador hermítico sobre el espacio de los estados \mathcal{H} , sea \hat{O} un operador con descomposición espectral formada por un conjunto de operadores proyección sobre el subespacio \mathcal{M} según $\{\hat{P}_m\}$ con autovalores m .

$$\hat{O} = \sum_m m \hat{P}_m \quad (\text{A.11})$$

la regla de completud $\sum_k \hat{P}_k^\dagger \hat{P}_k = 1$, se obtiene :

1. Uno de los autovalores³⁵⁰ -discretos o continuos³⁵¹ - de \hat{A} .
2. La probabilidad de obtener un resultado “ a_k ”, se calcula mediante la regla de Born:

$$\text{Prob}(k) = \langle \psi | P_k^\dagger P_k | \psi \rangle \quad (\text{A.15})$$

Esto quiere decir que, si el sistema se encuentra en un estado cualquiera $|\psi\rangle$ al medir la propiedad A representado por el operador hermítico es \hat{A} , donde $\hat{A}|a_k\rangle = a_k|a_k\rangle$ para $|a_k\rangle \in \mathcal{H}_k$ con $\{|a_k\rangle\}$ vectores propios asociados a los valores propios $\{a_k\}$, entonces la regla de Born toma la forma³⁵²:

Tras la medida:

$$p(m) = \langle \psi | P_m | \psi \rangle \quad (\text{A.12})$$

El sistema después de la medida será:

$$\frac{\hat{P}_m |\psi\rangle}{\sqrt{\langle \psi | P_m | \psi \rangle}} \quad (\text{A.13})$$

Ahora podemos estimar el valor medio esperado de un operador \hat{O} cuando el sistema se encuentra en el estado $|\psi\rangle$ será:

$$\mathbf{v}_m(\hat{O}) = \sum_m m p(m) = \sum_m m \langle \psi | P_m | \psi \rangle = \sum_m \langle \psi | \hat{O}_m \hat{O}_m^\dagger | \psi \rangle = \langle \hat{O} \rangle_{|\psi\rangle} \quad (\text{A.14})$$

Si preparamos un gran número de sistemas en el estado $|\psi\rangle$ entonces podemos realizar un gran número de experimentos para medir \hat{O} . El valor esperado de \hat{O} , $\langle \hat{O} \rangle_{|\psi\rangle} = \sum_n P_n o_n = \sum_n \langle \psi | n \rangle o_n \langle n | \psi \rangle$, con P_n proyector asociado a la descomposición espectral de \hat{O} .

Si los autovalores son degenerados, se debe buscar un conjunto de operadores asociados a otras propiedades, v.gr. \hat{Q}, \hat{S}, \dots que sean compatibles, es decir que compartan autovectores, lo que significa que su conmutador sea $[\hat{Q}, \hat{O}] = 0$ hasta que formen un conjunto completo o maximal de operadores que conmutan -propiedades compatibles-. Esto es lo que se conoce como preparación del estado.

Caso degenerado: cuando el sistema está representado por $|\psi\rangle$, admite descomposición espectral en la base de autovectores de \hat{O} , es decir $\sum_n \hat{P}_n = \sum_n \sum_{m=1}^{M(n)} |n, m\rangle \langle n, m| = I$ donde $m = 1, \dots, M(n)$ es el grado de multiplicidad de cada autovalor:

$$|\psi\rangle = \sum_{n,m} |n, m\rangle \langle n, m | \psi \rangle = \sum_{n,m} c_{n,m} |n, m\rangle$$

³⁵⁰La relación entre el autovalor obtenido y el estado final de proceso de medida que es el autovector correspondiente se conoce como principio de Enlace autovalor-autovector “*e/e link*”.

³⁵¹Si medimos una magnitud del continuo obtendremos resultados dentro de un intervalo.

³⁵²Los operadores proyección funcionan de la siguiente manera: si $|\psi\rangle = \sum_k a_k |\psi_k\rangle$ y aplicamos el proyector $\hat{P}_3 = (|\psi_3\rangle \langle \psi_3|)$, entonces: $\hat{P}_3 |\psi\rangle = (|\psi_3\rangle \langle \psi_3|) |\psi\rangle = (|\psi_3\rangle \langle \psi_3|) \sum_k a_k |\psi_k\rangle = \sum_k a_k |\psi_3\rangle \langle \psi_3 | \psi_k \rangle = a_3 |\psi_3\rangle$.

$$\boxed{Prob(k) = |\langle \psi | a_k \rangle|^2} \quad (A.16)$$

El resultado de la medida calculado mediante la regla de Born coincide con el valor medio esperado para esa propiedad:

$$\langle \hat{A} \rangle = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle \quad (A.17)$$

En el caso de un cubit, el resultado de la medida es aleatorio: al medir $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ obtendremos unas veces a con probabilidad $|a|^2$ y otras b con probabilidad $|b|^2$. Pero, además, si medimos ese cubit en una base cualquiera que no sea $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, por ejemplo en una base ortogonal conseguida mediante giro de un ángulo α de la base computacional (e.g. $\alpha = 45^\circ \rightarrow \{|+\rangle, |-\rangle\}$) entonces obtendremos resultados que son totalmente aleatorios sin que podamos recuperar los resultados a y b con las respectivas probabilidades $|a|^2$ y $|b|^2$.

El postulado de la medida tiene las siguientes consecuencias:

1. El proceso de medida es probabilista incluso en el caso de que el estado del sistema esté bien definido.
2. Antes de realizar la medida, no es lícito atribuir valores.
3. Sólo es posible obtener un valor propio bien definido en cada medida.
4. La probabilidad es independiente de la fase del vector de estado³⁵³.
5. Si dos operadores hermíticos tienen la misma resolución espectral - es decir tienen los mismos autovectores- corresponden a la misma propiedad medida aunque los autovalores sean diferentes.³⁵⁴

³⁵³Por eso el estado del sistema representado por un rayo conduce a las mismas probabilidades que el de cualquier vector de estado del rayo pues $|\Psi\rangle_R = e^{i\phi}|\psi\rangle$. Salvo casos particulares de la superposición y las mencionadas reglas de superselección.

³⁵⁴La cuestión se solventa formulando el proceso de medida en el conjunto de proyectores etiquetados por los resultados, que como hemos visto cumple: $\sum_k \hat{P}_k^\dagger \hat{P}_k = 1$.

A.1.4. Postulado 4.- Evolución del sistema bajo la medida.

Salto cuántico: si medimos el operador hermítico \hat{A} , cuyo conjunto de proyectores espectrales es $\{\hat{P}_k\}$ y el valor obtenido es “ a_k ”, entonces el estado físico del sistema cambia de forma irreversible y discontinua:

$$|\psi\rangle \rightarrow |\psi_k\rangle = \frac{P_k|\psi\rangle}{\sqrt{\langle\psi|P_k^\dagger P_k|\psi\rangle}} \quad (\text{A.18})$$

como veremos, la medida cambia el estado de forma automática -saltos cuánticos (ver fig.A.3) - a uno de los autoestados del conjunto de operadores que representan la propiedad medida.

Reproducibilidad, predictibilidad o constancia de las propiedades:

El postulado de colapso nos conduce a varias consecuencias trascendentales:

1. No se pueden producir saltos cuánticos entre estados ortogonales³⁵⁵, su probabilidad es 0.
2. Si se repite la medida inmediatamente después de la primera, se encuentra el mismo estado³⁵⁶. A esta característica también se la denomina “reproducibilidad” de los resultados y significa que inmediatamente después de la medida se conoce el autoestado y se puede predecir su futuro debido al determinismo que caracteriza a la evolución unitaria. Por esta razón, también los autores como Zurek hablan de predictibilidad (*predictability*).
3. Este postulado no informa sobre cómo ocurre el proceso de colapso.
4. Si antes de la medida el estado se describía mediante una superposición de estados, parte de la información sobre el estado se pierde tras la medida. Ésta no es más que la propiedad de accesibilidad: no todos los estados presentes en la superposición son accesibles. Estos quedan elegidos al seleccionar el conjunto de proyectores.
5. Según el postulado 2, la evolución del estado entre dos medidas es determinista, reversible y lineal, en directa contradicción con el postulado 4 que afirma que en el momento de la medida la evolución es indeterminista, irreversible y no lineal.
6. Este postulado también muestra que el proceso de medida no siempre es capaz de distinguir dos estados arbitrarios en contraste con los estados clásicos. Si los estados no

³⁵⁵Ver nota 347.

³⁵⁶Es decir, si al medir $|\psi\rangle$ se encuentra el resultado “ a_k ”, el estado del sistema tras la medida será $|a_k\rangle$ y una segunda medida inmediatamente posterior podrá corroborar el resultado, es decir $Prob(a_k) = 1$.

son ortogonales, parte de la información sobre el estado no es accesible a la inspección de la medida. De ahí que una de las tareas principales de la teoría cuántica de la información [Nielsen y Chuang, 2000, cap. 9-12] sea cuantificar la *distinguibilidad*.

Como hemos resaltado anteriormente, el único resultado del proceso de medida -el autovalor- queda ligado al nuevo estado surgido de dicha medida -el autoestado-. La descomposición del postulado de la media en dos subapartados, la unicidad del resultado y la regla de Born junto a la subsecuente relación entre autovalor y autovector. La condición del enlace autovalor obtenida con el autovector previo a ésta se mantuvo implícita en la formulación ortodoxa [von Neuman, 1932] hasta que [Fine, 1973a] la evidenció y demostró que no podía ser deducida del resto de los axiomas [Fine, 1973b]. Por lo tanto, esta condición extra está implícita a la presentación ortodoxa de la Mecánica Cuántica.

Un ejemplo de medida sencillo en el espacio bidimensional de la base estándar de los *cubits* $\{|0\rangle; |1\rangle\}$:

La probabilidad de obtener el valor 0 (1) al medir el *cubit*³⁵⁷ $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$:

$$p(0) = |\langle\psi|0\rangle|^2 = a^2|\langle 0|0\rangle|^2 = a^2$$

Tras este resultado, el estado del sistema pasa a ser: $|\psi\rangle \rightarrow |0\rangle$

$$p(1) = |\langle\psi|1\rangle|^2 = b^2|\langle 1|1\rangle|^2 = b^2$$

Tras este resultado, el estado del sistema pasa a ser: $|\psi\rangle \rightarrow |1\rangle$

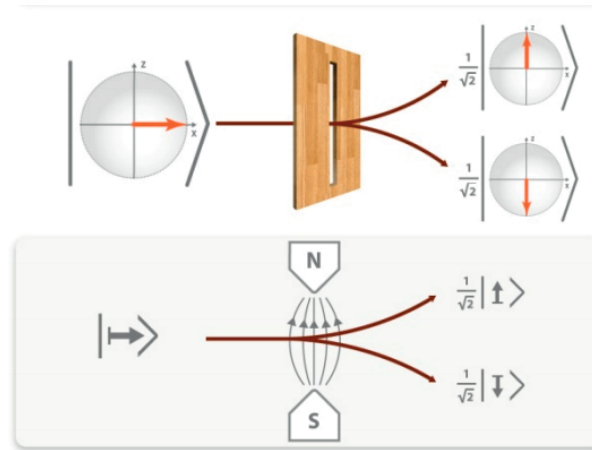


Figura A.3: Medida de un *cubit* en superposición. Imagen tomada de [Dür y Heusler, 2013]

³⁵⁷Por supuesto que $\hat{P}_0 = |0\rangle\langle 0|$ y $\hat{P}_1 = |1\rangle\langle 1|$ con $\hat{P}_0 + \hat{P}_1 = I$ y por lo tanto,

$$p(0) = \langle 0|\hat{P}_0\hat{P}_0^\dagger|0\rangle = |a|^2$$

$$p(1) = \langle 1|\hat{P}_1\hat{P}_1^\dagger|1\rangle = |b|^2$$

A.1.5. Postulado 5.- Composición de sistemas cuánticos.

Hasta ahora, se ha descrito el estado de un sistema simple. Es el momento de formalizar la estructura matemática de los estados de sistemas compuestos. Los sistemas físicos multicomponentes están detrás de la famosa paradoja del gato de Schrödinger y son esenciales para entender el problema de la medida.

Tal vez la forma más intuitiva de aproximarse a esta cuestión es pensar que, como hemos apuntado ya, si el principio de superposición se aplica universalmente a los sistemas cuánticos individuales, parece tener sentido el pensar que se debería aplicar también a los sistemas compuestos. Si el estado conjunto es el producto tensorial (o cartesiano) de los estados individuales, entonces parece tener cierto sentido imponer el principio de superposición al estado producto y postular que el estado del sistema resultante sea el del producto tensorial del espacio de estados de sus componentes.

El postulado de composición, también denominado de complejidad, puede enunciarse como sigue:

El espacio de estados correspondiente a un conjunto de sistemas cuánticos diferentes³⁵⁸ en interacción es el producto tensorial del espacio de estados de sus componentes..

Sea $\{|\psi_n\rangle\}$ el conjunto de estados correspondiente a $\{H_n\}$, entonces:

$$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \otimes \cdots \otimes |\psi_n\rangle \in H = H_1 \otimes H_2 \cdots \otimes H_n$$

Como se verá más adelante, el entrelazamiento de los estados de estas partículas reduce el potencial de alternativas.

Los sistemas cuánticos multicomponentes junto con su transformación mediante puertas cuánticas³⁵⁹ han dado lugar a las nuevas tecnologías de la comunicación y de la computación cuánticas. Un sistema cuántico bicomponente sencillo es el representado por dos *cubits*:

$$|\psi_1\rangle = a_1|0\rangle + b_1|1\rangle \in H_1 \text{ y } |\psi_2\rangle = a_2|0\rangle + b_2|1\rangle \in H_2$$

,por lo tanto, según el postulado (A.1.5): $|\psi\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$, es decir:

$$|\psi\rangle = a_1 a_2 |00\rangle + a_1 b_2 |01\rangle + b_1 a_2 |10\rangle + b_1 b_2 |11\rangle \in H_1 \otimes H_2.$$

³⁵⁸Si por ejemplo son dos partículas idénticas, bosones o fermiones, con estados asociados $|\psi_1\rangle$ y $|\psi_2\rangle$, entonces sólo le corresponde una parte de $H = H_1 \otimes H_2$.

³⁵⁹Los operadores que representan las transformaciones unitarias son las puertas lógicas cuánticas como la la puerta *C-Not*, que aplicada a $|\psi\rangle$ trasforma el bit2, si el bit1 es 1, y deja el bit1 de control fijo:

$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{CNOT}|\psi\rangle = \text{CNOT}(a_1 a_2 |00\rangle + a_1 b_2 |01\rangle + b_1 a_2 |10\rangle + b_1 b_2 |11\rangle)$$

$$\text{CNOT}|\psi\rangle = a_1 a_2 |00\rangle + a_1 b_2 |01\rangle + b_1 a_2 |11\rangle + b_1 b_2 |10\rangle \in H_1 \otimes H_2$$

Éste es el estado cuántico de un sistema de dos componentes. Es fácil comprobar que estados bicomponentes³⁶⁰ como los denominados estados de Bell:

$$|\Psi^B\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 \pm |1\rangle_1|1\rangle_2); |\Psi_B\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_1|0\rangle_2 \pm |0\rangle_1|1\rangle_2)$$

no se pueden poner como producto tensorial del estado del primer *cubit* $|\psi_1\rangle \in H_1$ por el segundo *cubit* $|\psi_2\rangle \in H_2$. Es decir:

$$|\Psi_i^d\rangle \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Esto nos conduce a los conceptos de separabilidad, entrelazamiento o enredo cuánticos y localidad, que, por sencillez, presentamos en el caso de sistemas bipartitos.

Separabilidad. (Estados puros): *Un estado puro se dice separable en sus componentes, o simplemente separable, si el estado del sistema conjunto $|\psi\rangle$, que pertenece a un conjunto de estados H , es igual al producto de los estados separados:*

$$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \quad (\text{A.19})$$

tales que $|\psi_1\rangle \in H_1$ y $|\psi_2\rangle \in H_2$.

La separabilidad es una propiedad dinámica³⁶¹, pues dos sistemas dinámicamente independientes no se influyen mutuamente.

El estado se dice entrelazado o enredado cuando no admite tal factorización.

El Entrelazamiento Cuántico

Se denominan estados entrelazados o enredados (*En alemán Verschränkung y en inglés: entangled*), a aquellos estados conjuntos de sistemas multicomponentes que no pueden ser realizados como producto tensorial de los estados de los componentes. Estos estados entrelazados son consecuencia del principio de superposición y del postulado de composición. En palabras de Erwin Schrödinger:

Siempre que uno tenga un catálogo completo [de propiedades] esperado (un conocimiento total máximo) (una función psi) de dos cuerpos completamente separados o, mejor dicho, para cada uno de ellos individualmente, obviamente uno también lo tiene para los dos cuerpos juntos, es decir, si uno se imagina que ninguno de ellos individualmente sino más bien los dos juntos constituyen el objeto de interés de nuestra pregunta sobre el futuro. Pero lo contrario no es cierto. El conocimiento

³⁶⁰Los subíndice 1 y 2 denotan los sistemas 1 y 2 respectivamente, v.gr. fotón 1 ó 2.

³⁶¹La cuestión de si esta característica dinámica tiene un carácter causal y, de ser así, de qué tipo es éste, sigue debatiéndose. Trataremos el problema de la causalidad en mecánica cuántica más adelante. Para más información se puede consultar el artículo sobre el estado de la cuestión en [Suárez, 2005].

máximo de un sistema total no incluye necesariamente el conocimiento total de sus partes, ni siquiera cuando están completamente separadas entre sí y en este momento no hay influencia mutua. [Schrödinger, 1935, p. 160]

Con otras palabras, en el ámbito cuántico, tras la interacción de dos cuerpos se presenta una dependencia dinámica entre los subsistemas que forman el sistema conjunto incluso cuando los dos subsistemas se encuentran en localizaciones espaciales distantes. Por tanto, los dos subsistemas muestran correlaciones de tipo cuántico. Esto significa que existe una especie de relación holística entre los dos subsistemas. La naturaleza del estado conjunto no es la de las partes, esto quiere decir que mediante medidas locales de cualquiera de los subsistemas no podemos averiguar el estado conjunto. El estado del conjunto no es el estado de las partes y esto se debe a que una medida del estado en el primer sistema, cambia el estado - según el postulado de colapso - del segundo sistema, independientemente de la distancia que medie entre ellos.

El entrelazamiento es, tal vez, la seña más importante del carácter cuántico de un sistema: supone una de las implicaciones metafísicas más destacables de la Teoría Cuántica: la no localidad y el correspondiente carácter holístico de la función de onda. El concepto de no localidad está relacionado con el límite natural al cual las señales físicas se puede transmitir: la velocidad de la luz en el vacío. J.S.Bell demostró que si se hacen medidas aleatorias en dos sistemas entrelazados que se encuentran en localizaciones distintas , no existe una teoría local que pueda conseguir las mismas predicciones que la mecánica cuántica [Bell, 1990, pp. 41-51].

Desde la perspectiva de la física aplicada, el enredo cuántico proporciona los recursos necesarios para las nuevas tecnologías de la segunda revolución cuántica: la criptografía, la comunicación y la computación cuánticas.

Analicemos brevemente la naturaleza de los estados entrelazados, mediante el estudio de sus desconcertantes propiedades:

1. Existe la posibilidad de tener información completa del estado conjunto y desconocer totalmente la información de sus partes³⁶².
2. El entrelazamiento parece evidenciar la naturaleza no local u holística del mundo: al separarse los dos subsistemas a localizaciones remotas, el estado cuántico compartido por los dos se deslocaliza.
3. El entrelazamiento no sirve para transmitir información útil superlumínica. Es un tipo de correlación especial que no requiere de una interacción al modo clásico.
4. El entrelazamiento entre sistemas se puede dar de forma parcial.

³⁶²En la sección dedicada a la información cuántica estudiaremos cómo esta condición se puede formular con respecto a las entropías.

En lo que sigue comentaremos estas propiedades.

Al realizar la medida de un par entrelazado, los resultados están correlacionados cuánticamente independientemente de la distancia a que se encuentren uno del otro. Al medir en la base computacional el primer *cubit* del estado de Bell $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 \pm |1\rangle_1|1\rangle_2)$ encontramos, de forma aleatoria, “0” ó “1” con probabilidad de $\frac{1}{2}$. Si hemos obtenido en la medida del primer miembro del par 1 (0), entonces tenemos la certeza de obtener 1 (0) en la medida del segundo.

Las correlaciones cuánticas, que no deben confundirse con las correlaciones estadísticas clásicas³⁶³, no sirven para transmitir información superlumínica porque el resultado de la medida del primer *cubit* es totalmente aleatorio. Para conocer el estado del segundo miembro del par en una región separada suficientemente del primero, es necesaria una comunicación tradicional - lumínica o sublumínica- para informar, antes de que se mida el segundo miembro del par, sobre la base seleccionada para esa medida y el resultado del experimento del primer miembro del par.

Una pregunta muy importante para entender el proceso de decoherencia y la transición cuántico-clásico propuesta por el Darwinismo Cuántico, está relacionada con la naturaleza del grado de entrelazamiento: los sistemas al interactuar pueden entrelazarse totalmente, pueden quedar parcialmente entrelazados o pueden no estar enredados -estados separables-. Si los sistemas están parcialmente enredados, esto significa que existe un cierto solapamiento entre las componentes de la base y entonces las correlaciones entre los subsistemas no tienen por qué ser uno a uno, ni ortogonales como en el caso del máximo entrelazamiento que representan los estados de Bell. En este sencillo caso, los estados entrelazados son completamente distinguibles. Pero esta no es la regla general: el entrelazamiento parcial despierta el interés en calcular el grado de entrelazamiento o solapamiento y, por tanto, de información accesible y distinguibilidad de los subsistemas tras una medida.

Los pares entrelazados se pueden crear directamente mediante procesos físicos, como la creación de pares de fotones con polarizaciones entrelazadas en cristales paramétricos de conversión a la baja, o se pueden preparar en pares de partículas distantes mediante medidas locales en el proceso conocido por el nombre de entrelazamiento por intercambio (*entanglement swapping*).

Esta preparación sin interacción local es una propiedad exclusivamente cuántica que extiende el fenómeno denominado teleportación cuántica y, por lo tanto, está relacionada con la no separabilidad y no localidad de los sistemas cuánticos. El entrelazamiento encuentra un significado más profundo cuando se puede inducir sin la necesidad de una interdependencia dinámica entre sistemas. Es decir, se pueden llegar a entrelazar dos partículas que nunca han sufrido una interacción mutua. El experimento llevado a cabo por el grupo de Anton Zeilinger [Zukowski et al., 1993], mostró que si tomamos dos pares

³⁶³Las correlaciones clásicas tienen su origen en principios de conservación, etc.

entrelazados (fig.A.4) que son dinámicamente independientes, porque se han generado mediante dos cristales paramétricos de conversión a la baja distintos, es posible que los miembros complementarios del par que nunca tuvieron interacción (el I2 y el D2) queden entrelazados³⁶⁴ mediante medidas locales entre miembros distintos de los pares (el I1 y el D1) .

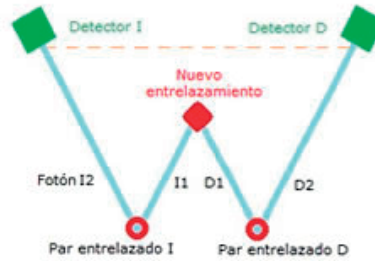


Figura A.4: Intercambio por entrelazamiento.

Un ejemplo tipo de creación de entrelazamiento en información cuántica es el denominado circuito de Bell: tenemos dos sistemas independientes preparados en el estado $|0\rangle$, el primero pasa por una puerta de Hadamard, a continuación, el estado conjunto transita por una puerta CNOT. El resultado es una de las bases entrelazadas de Bell $|\Psi^d\rangle$.

$$\left\{ \begin{array}{l} |0\rangle \rightarrow \mathbb{H} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \\ |0\rangle \end{array} \right. \rightarrow |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 \pm |1\rangle_1|0\rangle_2)$$

$$\rightarrow \text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2)$$

³⁶⁴Esta operación se puede implementar mediante circuitos cuánticos. Ver, por ejemplo, [Nielsen y Chuang, 2000, p. 22-25].

A.2. Estados mezcla

A.2.1. El formalismo de las matrices de densidad.

Los estados mezcla incorporan la posibilidad de incluir aquellas preparaciones³⁶⁵ de estados puros que, en condiciones normales, se realizan con cierta probabilidad, v.gr. para cada estado:

$$p_1 \rightarrow |\psi_1\rangle \quad p_2 \rightarrow |\psi_2\rangle \quad p_3 \rightarrow |\psi_3\rangle \quad \dots \quad p_r \rightarrow |\psi_r\rangle$$

Si la colectividad (*ensemble*) viene representada por $\{p_k, |\psi_k\rangle\}$ el sistema así descrito tiene la probabilidad p_k de estar en el estado $|\psi_k\rangle \in \mathcal{H}$ con $0 \leq p_k \leq 1$ donde $\sum_i p_i = 1$.

La probabilidad de obtener un resultado de la medida, $p(k)$, dadas unas preparaciones al azar $p_r(i)$, se puede calcular mediante la probabilidad:

$$p(k) = \sum_i p_r(k/i) p_r(i) \quad (\text{A.20})$$

donde la probabilidad $p_r(k/i)$ es de tipo cuántico porque proviene de una preparación cuántica y se calcula mediante la regla de Born con $\{\hat{P}_k\}$ conjunto de proyectores ortogonales:

$$p_r(k/i) = \langle \psi_i | \hat{P}_k | \psi_i \rangle \quad (\text{A.21})$$

si introducimos esta probabilidad en (A.20) y utilizamos la operación traza³⁶⁶, la probabilidad de un resultado k toma la forma:

$$p(k) = \sum_i \langle \psi_i | \hat{P}_k | \psi_i \rangle p_r(i) = \sum_i \text{Tr}(\hat{P}_k |\psi_i\rangle \langle \psi_i|) p_r(i) \quad (\text{A.22})$$

y por lo tanto, utilizando las propiedades de la traza

$$p(k) = \sum_i \text{Tr}(\hat{P}_k |\psi_i\rangle \langle \psi_i|) p_r(i) = \text{Tr}(\hat{P}_k (\sum_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i| p_r(i))) = \text{Tr}(\hat{P}_k \hat{\rho}) \quad (\text{A.23})$$

Definimos el operador densidad³⁶⁷ de una mezcla de estados:

$$\hat{\rho} \equiv \sum_i |\psi_i\rangle p_i \langle \psi_i| \quad (\text{A.24})$$

³⁶⁵También denominadas medidas de primera especie son aquellas medidas que preparan el sistema en el estado con propiedades definidas de forma que una medida consecutiva encuentre el mismo resultado.

³⁶⁶Teniendo en cuenta el teorema de descomposición espectral (A.1.3), si \hat{O} es autoadjunto, es un operador de clase traza y se puede definir la operación $\text{Tr}(\hat{O}) = \sum_i \langle \alpha_i | \hat{O} | \alpha_i \rangle$ con las propiedades: $\text{Tr}(a\hat{O} + b\hat{Q}) = a\text{Tr}(\hat{O}) + b\text{Tr}(\hat{Q})$ y en el caso de que \hat{Q} sea acotado - $|\hat{Q}|\alpha\rangle| \leq q|\alpha\rangle|$ con $q \in \mathbb{R}$ - entonces $\text{Tr}(\hat{O}\hat{Q}) = \text{Tr}(\hat{Q}\hat{O})$. En particular, si se toman operadores proyección entonces $\text{Tr}(\hat{P}) = 1$ se realiza sobre un subespacio de n dimensiones de \mathcal{H} entonces $\text{Tr}(\hat{P}_n) = n$. Los operadores densidad ρ pertenecen a los operadores de clase de traza $\text{Tr}(\rho) = 1$.

³⁶⁷Si concretamos el caso eligiendo una base determinada, podemos obtener la representación del operador densidad en la llamada matriz densidad. En la literatura aparecen confundidos estos dos conceptos.

donde p_i representa la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado $|\psi_i\rangle$ y cumple $0 \leq p_i \leq 1$ y $\sum_i p_i = 1$. Por lo tanto, la media de la colectividad $\{p_k, |\psi_k\rangle\}$ queda totalmente descrita por el operador densidad así definido.

Si el operador densidad corresponde a un proyector sobre un vector en el espacio de Hilbert, entonces se denomina estado puro:

$$\hat{\rho}_{puro} \equiv |\psi\rangle\langle\psi| \quad (A.25)$$

Como el vector de estado cumple el principio de superposición $|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle$, el operador densidad toma la forma:

$$\hat{\rho} \equiv \sum_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i| = \sum_{i,j} c_i c_j^* |\psi_i\rangle\langle\psi_j| = \sum_i |c_i|^2 |\psi_i\rangle\langle\psi_i| + \sum_{i,j} c_i c_j^* |\psi_i\rangle\langle\psi_j|$$

Por lo tanto, el operador densidad de un estado puro puede descomponerse en dos partes:

$$\hat{\rho}_{puro} = \sum_i |c_i|^2 |\psi_i\rangle\langle\psi_i| + \sum_{i,j} c_i c_j^* |\psi_i\rangle\langle\psi_j| \quad (A.26)$$

En la representación de la matriz densidad del estado puro, los coeficientes que no se encuentran en la diagonal representan los términos de interferencia.

Varias son las cuestiones delicadas que es necesario recordar:

1. La apariencia de la matriz densidad no nos dice directamente si representa una mezcla propia -distribución estadística clásica- o una mezcla impropia, es decir si representa un estado puro: si tenemos sólo la información que procede de (A.24), es decir, si no sabemos el conjunto de estados de la preparación, entonces no podemos interpretar la matriz densidad como una mezcla propia al modo de la física estadística y, por lo tanto, las probabilidades no serán epistémicas es decir, no se interpretarán como ignorancia del estado en el que se encuentra el sistema. El estado representado por la matriz densidad podría estar en un estado puro, es decir aquél en que los subsistemas se dan a la vez y, por lo tanto, existiría un grado de coherencia entre las componentes de la superposición: el estado indefinido o la falta de certidumbre sobre la definición implicaría incertidumbre sobre la ontología.

2. La matriz densidad explícitamente no nos informa sobre la naturaleza del estado. Esta cuestión no es más que la conocida ambigüedad de la base³⁶⁸, como la ecuación $\hat{\rho} \equiv \sum_i |\psi_i\rangle p_i \langle\psi_i|$ no define una descomposición única, ya que el mismo estado cuántico puede venir asociado a distintas mezclas estadísticas, esto implica que, aunque la representación del operador sea diagonal - es decir, los términos $i \neq j$ sean 0 -, de ahí no se debe concluir que el sistema carezca de naturaleza cuántica porque, en otra base distinta, pueden reaparecer los términos de interferencia.

3. La matriz densidad representa un sistema cuántico pero a la vez es un operador:

La consecuencia de esta doble representación es importante porque parece que puede llevar a contradicción. Como veremos, la matriz densidad representa de forma completa el estado físico del sistema y esta circunstancia nos podría llevar a la confusión de pensar que, al medir la matriz densidad, deberíamos obtener información completa. Pero como hemos visto, la matriz densidad puede describir un estado puro o una mezcla. Si fuera puro, al medirlo sólo conoceríamos si se encuentra en el estado y no cuál es el estado. Auletta utiliza el siguiente ejemplo: no es lo mismo dar una descripción completa de una manzana -conocer el estado- que saber si es o no una manzana -saber si está en ese estado- [Auletta y Wang, 2014, p. 191]. Si la matriz densidad representara una mezcla propia, una medida nos informaría en cuál de los subespacios componentes de la mezcla se encuentra, pero sería incapaz de distinguir la naturaleza de los miembros de la mezcla. Es decir, si son ortonormales mutuamente o no. Así pues, no tenemos con una medida la distribución de todas las propiedades.

Es fácil demostrar que el operador densidad de los estados puros $\hat{\rho}$ es idempotente, es decir, cumple:

$$\hat{\rho}^2 = \hat{\rho} \quad (\text{A.27})$$

La operación traza aplicada a la matriz densidad de un estado puro es $\text{Tr}(\hat{\rho}) = 1$. En el caso general $\text{Tr}(\hat{\rho}^2) \leq 1$, lo que nos lleva a concluir que la pureza de los estados es una cuestión de grado. Por eso podemos definir el grado de impureza³⁶⁹ de un estado como:

$$\mathbb{I} = 1 - \text{Tr}(\hat{\rho}^2)$$

También podemos intuitivamente captar la idea de los espacios de matrices densidad con una esfera maciza de Bloch (fig.A.5). Los puntos de su superficie representan los estados puros y todos los puntos del interior representan los casos mezcla.

³⁶⁸Tanto si hay autovalores a los que les corresponde más de un autovector - es decir si existe degeneración- como si no, la descomposición espectral no es única esto significa que, para todo $a; b \in \mathbb{R}$ y tal que $\sum_i a_i = \sum_i b_i = 1$, $\hat{\rho} = \sum_i a_i \hat{P}_i = \sum_i a_i \hat{P}_i'$ ó $\hat{\rho} = \sum_i a_i \hat{P}_i = \sum_i b_i \hat{P}_i'$.

³⁶⁹Más adelante veremos que otra medida de la pureza de la matriz densidad $\hat{\rho}$ es la llamada Entropía de Von Neumann.

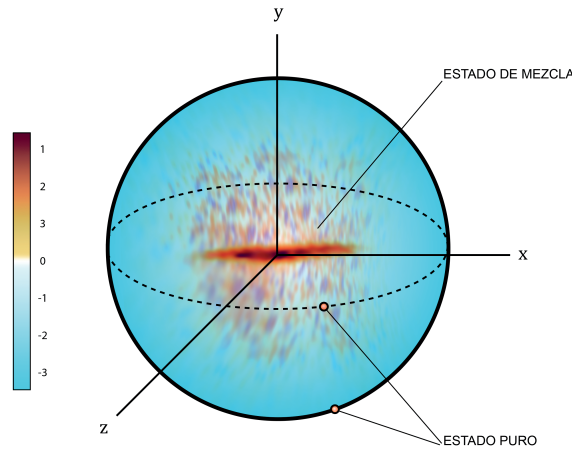


Figura A.5: Matrices densidad representadas en una esfera de Bloch. Los puntos interiores de la esfera corresponden a los estados mezcla, salvo el centro. Los puntos sobre la superficie representan a los estados puros. Fuente, internet y elaboración propia.

La diferencia entre cualquier punto del interior y el centro es que el estado mezcla del centro está formada por pares ortogonales. Se encontrará una visión general en [Penrose, 2006, pp. 1061-1063] y una formulación exhaustiva en [Hughes, 1992, pp. 139-141].

En esta nueva representación del estado mediante el operador densidad, es posible enunciar los postulados de la mecánica cuántica con mas generalidad:

1. Postulado de completud para estados mezcla

A todo estado del sistema del que tenemos información parcial o estado mezcla, se le asocia un operador densidad $\hat{\rho}$ acotado y autoadjunto ($\hat{\rho} = \hat{\rho}^\dagger$), positivo ($\hat{\rho} \geq 0$) y de traza unidad $Tr(\hat{\rho}) = 1$.³⁷⁰

2. La evolución temporal de sistemas aislados : La evolución temporal de un sistema cuántico³⁷¹ cerrado para los estados mezcla obedece a la ecuación de Louville-von Neumann:

$$i\hbar \frac{d}{dt} \rho(t) = [H(t), \rho(t)] \quad (\text{A.28})$$

donde $[\cdot, \cdot]$ representa la operación de conmutación, H es el hamiltoniano del sistema y \hbar es la constante reducida de Planck . Es la extensión natural de la ecuación de Louville clásica.

³⁷⁰Recordemos que un operador $\hat{\rho}$ es positivo si $\langle \psi_i | \hat{\rho} | \psi_i \rangle \geq 0$ y es de los operadores de traza unidad lo que relaciona a la traza con las probabilidades.

³⁷¹Se obtiene al sustituir $|\Psi(t)\rangle$ por $\rho(t)$ en A.3.

Esta ecuación implica que la variación del operador densidad en el tiempo viene dictada por una transformación unitaria U :

$$\rho(t) = U(t, t_0)\rho(t_0)U^\dagger(t, t_0) \quad (\text{A.29})$$

Al igual que en el caso de los estados puros, los pesos estadísticos - las componentes puras de ρ - no cambian durante la evolución temporal.

3. Postulado de la Medida

Sea $\hat{\rho}$ la matriz de densidad que representa el estado del sistema y $\{\hat{P}_k\}$ un conjunto de operadores -posibles resultados de la medida de una propiedad \hat{A} - que actúan en el espacio de Hilbert \mathcal{H} y que respetan la relación de cierre $\sum_k \hat{P}_k \hat{P}_k^\dagger = I$.

La probabilidad de que el estado $\hat{\rho}$ se encuentre en \hat{P}_k satisface la regla de Born:

$$p(k) = \text{Tr}(\hat{P}_k \hat{\rho} \hat{P}_k^\dagger) \quad (\text{A.30})$$

4. El postulado de colapso o evolución del estado bajo la medida.

La medida del operador $\hat{\rho}$ cambia el estado del sistema a $\hat{\rho}_k$ y su cálculo se consigue mediante el algoritmo:

$$\hat{\rho}_k = \frac{\hat{P}_k \hat{\rho} \hat{P}_k^\dagger}{\text{Tr}(\hat{P}_k \hat{\rho} \hat{P}_k^\dagger)} \quad (\text{A.31})$$

5. Postulado de Complejidad o composición para estados mezcla

Separabilidad.(*Estados mezcla*): El estado del sistema bipartito del que poseemos información parcial representado por el operador $\hat{\rho}$ es separable si cada uno de los subsistemas $\hat{\rho}_i^M \in H_M$ y $\hat{\rho}_i^N \in H_N$ cumplen:

$$\hat{\rho} = \sum_i p_i \hat{\rho}_i^M \otimes \hat{\rho}_i^N \quad (\text{A.32})$$

Siendo p_i la probabilidad y cumpliendo $0 \leq p_i \leq 1$ y $\sum_i p_i = 1$

El estado $\hat{\rho}$ se dice entrelazado o enredado cuando no admite esta factorización.

La descomposición espectral de (A.32) implica que tanto $\hat{\rho}_i^M$ como $\hat{\rho}_i^N$ se puedan interpretar como estados puros, pero a diferencia del caso de la separabilidad de los estados puros descritos en (A.19), la matriz densidad $\hat{\rho}$ incorpora correlaciones

de tipo estadístico, pues las preparaciones de los pares también es de tipo local con probabilidades p_i . Si en vez de ser factorizable, $\hat{\rho}$ representa un estado entrelazado, a esa correlación estadística se le incorpora otra correlación de naturaleza exclusivamente cuántica debida al enredo.

De los postulados enunciados, se deduce que el operador densidad describe completamente la medida de las probabilidades, la evolución del estado entre medidas y tras la medida. Esto implica que el operador densidad es una descripción completa del estado del sistema.

A.2.2. Matriz densidad reducida

Sea un sistema bipartito compuesto por un subsistema A , representado por $\rho_A \in \mathcal{H}_A$, cuyo estado se encuentra entrelazado con el estado de un subsistema E , representado por $\rho_E \in \mathcal{H}_E$. Si la matriz densidad del sistema compuesto es $\rho_{AE} \in \mathcal{H}_{AE} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_E$, todo lo que podemos saber sobre este sistema se extrae mediante medidas locales en uno de los subsistemas, por ejemplo en A . Toda la información disponible en A se calcula mediante la matriz densidad reducida:

$$\hat{\rho}_A = \text{Tr}_E(\hat{\rho}) \quad (\text{A.33})$$

Por lo tanto, con el objetivo de obtener los resultados de la predicción estadística de la medida, la suposición adicional esencial consiste en sustituir el operador densidad, que representa el estado conjunto después de la interacción $\hat{\rho}_{AE}$, por la matriz densidad reducida obtenida al operar sobre los grados de libertad de E , $\hat{\rho}_A^E$.

Para definir la matriz densidad reducida se usa la operación conocida como traza parcial Tr_E que representa una suma promedio sobre los estados no accesibles correspondientes al sistema E . Para justificar esta operación es conveniente retomar las conclusiones del teorema de descomposición espectral³⁷², en el que un operador \hat{A} presenta una descomposición única con operadores proyección \hat{P}_k sobre los subespacios ortogonales de H para cada conjunto de escalares $\{a_1, ..a_m\}$ según:

$$\hat{A} = \sum_k^m a_k \hat{P}_k = \sum_k^m a_k |\psi_k\rangle \langle \psi_k|$$

\hat{A} es un operador que representa una propiedad medible del sistema A , si al aplicar un operador \tilde{A} en el sistema AE conjunto obtenemos la misma medida, es decir la misma estadística de los resultados, se puede demostrar [Nielsen y Chuang, 2000, p. 107] la siguiente relación:

$$\tilde{A} = \sum_i^m a_i \hat{P}_i \otimes I_E = \hat{A} \otimes I_E \quad (\text{A.34})$$

³⁷²Ver nota (A.1.3).

Como hemos comentado, el argumento para conseguir los resultados de la predicción estadística es que la medida de la propiedad sea independiente de que haya sido obtenida mediante el operador \hat{A} sobre el estado ρ_A del subsistema A que mediante el operador \tilde{A} sobre el estado ρ_{AE} del sistema conjunto. Por lo tanto

$$Tr(\hat{A}\rho_A) = Tr(\tilde{A}\rho_{AE}) = Tr((\hat{A} \otimes I_E)\rho_{AE})$$

que sólo se cumplen en caso de que $\hat{\rho}_A \equiv Tr_E(\hat{\rho})$

Es importante destacar varias conclusiones sobre la matriz densidad reducida y la evolución del sistema desde la matriz densidad a la matriz densidad reducida.

1. La matriz densidad reducida no representa el estado AE ni el estado del sistema, simplemente nos lleva a la estadística procedente de los resultados de medir sólo el sistema A . En este sentido es una herramienta matemática. *Representa una mezcla impropia porque el estado SE sigue entrelazado.*
2. Para extraer información de un sistema compuesto se utilizan medidas locales sobre un sistema singular, lo que supone pérdida de información, entendida como la no posibilidad de acceder a todas las componentes de la superposición. La clave matemática para entender la transición es la siguiente: la fase del sistema entrelazado se transfiere al entorno, es decir, se deslocaliza en los grados de libertad del entorno. Al aplicar la operación de promediar sobre los grados de libertad del entorno -operación de grano grueso- nos centramos en el sistema y perdemos la información que nos aporta la fase - el entrelazamiento- que está contenida en el entorno y es prácticamente inaccesible.
3. Como acabamos de comentar, esta operación de paso de la matriz densidad a la matriz densidad reducida parece acometerse a través de una operación denominada de grano grueso o "a bulto". Como veremos³⁷³, esto no es del todo correcto porque la matriz de densidad reducida representa todo el conocimiento accesible del sistema entrelazado y, sobre todo, porque se puede realizar la operación en el formalismo equivalente de las integrales de camino de Feynman mediante las integrales de camino restringido - *restricted path integral*³⁷³ - que no requieren la operación de grano grueso. En realidad, la disputa entre las descripciones de grano grueso y grano fino esconde una preferencia metafísica que se resume en creer que existe una ontología fundamental y otra de segundo orden. Se presupone que la ontología del continuo es la fundamental y que la ontología discreta es simplemente secundaria o derivada. Éste es el compromiso metafísico de aquellos que propugnan la reducción ontológica entre teorías y la emergencia epistémica.

³⁷³La evolución del sistema se representa por una integral compuesta por todas las posibles trayectorias. Esta descripción no encuentra una interpretación clara desde el punto de vista de la ontología pues la suma se realiza sobre las trayectorias no locales, discontinuas y por tanto no clásicas.

4. La evolución de la matriz densidad a la matriz densidad reducida no es lineal, sigue la denominada ecuación maestra. Este proceso depende del hamiltoniano completo del sistema y del entorno y, por lo tanto, depende fuertemente del modelo concreto.

A.3. La Interpretación Mínima.

El objetivo principal del enfoque instrumentalista es construir una axiomatización operacional de la mecánica cuántica [Hardy, 2001]. Para ello se fija lo que se ha venido a denominar la interpretación mínima.

Para abordar el problema de la interpretación, conviene comenzar por seguir la estrategia operacionalista que, recordamos, describe todos los elementos del formalismo en términos de una lista de instrucciones donde se explicita cómo realizar las operaciones en el laboratorio. No obstante, la interpretación mínima se libra del contenido filosófico, pues tras sus enunciados se pueden encontrar suposiciones interpretativas -como la relación entre el autovalor y el autovector-.

Bajo esta perspectiva, $|\psi\rangle$ no representa el estado del sistema sino la lista de instrucciones para su preparación (P). El operador hermítico \hat{A} ³⁷⁴ satisface la descomposición espectral $\hat{A} = \sum_k a_k \hat{P}_k$ sobre el conjunto de operadores proyección $\{\hat{P}_k\}$ perteneciente a los subespacios de \hat{A} con autovalor a_k . Por supuesto, \hat{A} no representa una propiedad sino el conjunto de instrucciones que debemos seguir para realizar una medida (M).

Por lo tanto, para una preparación (P) dada, el cálculo de las probabilidades de obtener el resultado k después de una medida (M) seguirá la regla de Born:

$$Pr(k, P|M) = \langle \psi | P_k | \psi \rangle \quad (A.35)$$

Ahora bien, en este esquema de preparación (P) y medida (M), se puede intercalar el postulado de evolución lineal determinista simplemente imponiendo que la transformación de los proyectores entre la preparación y la medida sea unitaria. Es decir, la regla de Born se expresaría según:

$$Pr(k, P|M) = \langle \psi | U^\dagger P_k U | \psi \rangle \quad (A.36)$$

Esta transformación unitaria se puede realizar sobre los operadores proyección, representación de Heisenberg, o sobre los estados, representación de Schrödinger.

El postulado de colapso, que proyecta el estado preparado sobre el subespacio k del espacio de Hilbert, es sólo un algoritmo para describir la preparación o la medida y tiene la forma:

³⁷⁴PVM.

$$|\psi\rangle \rightarrow |\psi_k\rangle = \frac{P_k|\psi\rangle}{\sqrt{\langle\psi|P_k^\dagger P_k|\psi\rangle}} \quad (\text{A.37})$$

Por supuesto, esta formulación operacional de la Teoría Cuántica no es del tipo más general. Como hemos visto en los apartados anteriores, en el formalismo se pueden utilizar operadores densidad para representar a los estados y diversos tipos de transformaciones y medidas.

Existen dos estrategias principales para formalizar la interpretación mínima: una entiende que es más conveniente estudiar la teoría cuántica en función de estados puros, operaciones unitarias y medidas proyectivas en espacios de Hilbert grandes y la otra presenta la teoría cuántica en función de estados mezcla, con transformaciones CPTPM y medidas no proyectivas POVM sobre espacios de Hilbert pequeños. Algunos autores utilizan las dos aproximaciones. No obstante, a través de la operación denominada purificación es posible recuperar la primera representación desde la segunda.

Así pues, la denominada interpretación mínima de la Mecánica Cuántica bajo la representación de estados mezcla y medidas no proyectivas (POVM) es la siguiente:

Postulado 1: a cada preparación P se le asocia un operador densidad ρ .

Postulado 2: toda transformación se representa mediante un TPCP (*Trace Preserving Completely Positive Map*).

$$\rho \rightarrow \rho' = \mathcal{T}(\rho) \quad (\text{A.38})$$

Postulado 3: a cada medida M le corresponde un operador POVM (Positive Operator-Value-Measure- $\{\hat{E}_k\}$). La probabilidad de obtener el valor k tras medir M dada la preparación P es:

$$Pr(k, P|M) = Tr(\rho E_k) \quad (\text{A.39})$$

Postulado 4: a cada resultado k de la medida le viene asociado una TNICPLM (*Trace-Nonincreasing Completely-Positive linear Map*) \mathcal{T}_k tal que:

$$\rho \rightarrow \rho_k = \frac{\mathcal{T}_k(\rho)}{Tr(\mathcal{T}_k(\rho))} \quad (\text{A.40})$$

Apéndice B

El concepto de información de Shannon

La primera teoría clásica que abordó la medida de la incertidumbre se basaba en los conceptos de necesidad y posibilidad: cuando tenemos un conjunto de alternativas excluyentes y sólo una de las alternativas es verdadera, se debe conseguir información relevante para descubrir la alternativa verdadera. Esto significa que del conjunto de alternativas, algunas no son posibles. Entonces, del conjunto de alternativas debemos descartar las no posibles mediante preguntas que secuencialmente nos dividan este conjunto en dos grupos excluyentes: un conjunto en el que está la alternativa verdadera y otro en el que no se encuentra. El número total de esas preguntas nos llevará a la alternativa verdadera.

En 1928 Hartley presentó la medida de incertidumbre como el logaritmo de la función de posibilidad básica: su valor es la unidad cuando una alternativa pertenece a las alternativas posibles y cero en caso contrario.

Imaginemos que tenemos n alternativas posibles y nuestro diagnóstico selecciona entre dos posibilidades. Si dividimos las n alternativas entre dos, la alternativa verdadera caerá en uno de esos dos grupos. Este primer paso representa un bit de información. Repetimos esta operación con el grupo donde se encuentra la alternativa verdadera, es decir lo dividimos por 2. Si realizamos esta sencilla operación I veces hasta que sólo nos quede la alternativa verdadera, hemos calculado el número de bits necesarios para seleccionar una alternativa de n posibles:

$$\frac{n}{2^I} = 1 \rightarrow I(n) = \log_2 n \quad (\text{B.1})$$

en el experimento hemos supuesto que el número de alternativas es finito $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ y que hay equiprobabilidad entre las alternativas. Es decir, $p(x_1) = p(x_2) = \dots = p(x_n) = \frac{1}{n}$ lo que implica que $p(x_i) = \frac{1}{n}$. Con lo que llegamos a la expresión tradicional de la información como reducción de la incertidumbre al obtener x_i :

$$I(x_i) = \log_2 \frac{1}{p(x_i)} = -\log_2 p(x_i) \quad (\text{B.2})$$

Ésta es la medida de la cantidad de información individual cuando se produce el resultado x_i . Ahora bien, si no todas los posibles resultados tienen la misma probabilidad y las alternativas son independientes, entonces parece intuitivo que cada medida individual de información sea pesada por la probabilidad de que se obtenga dicha medida.

$$I(X) = p(x_1)I(x_1) + p(x_2)I(x_2) + \dots + p(x_n)I(x_n) \quad (\text{B.3})$$

Esta circunstancia nos permite introducir el concepto de valor medio de la incertidumbre antes de obtener el posible resultado x_i o valor medio de la información que se podría obtener de dicho resultado:

$$H(P) = \sum_{i \in n} p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (\text{B.4})$$

Con la $\sum_i p(x_i) = 1$

Esta presentación intuitiva esconde la otra noción clásica de medida de la incertidumbre que está relacionada directamente con la teoría de las probabilidades y no requiere de los conceptos de necesidad y posibilidad.

Siguiendo la exposición de [Uffink, 1990], supongamos que podemos plantear un experimento aleatorio, esto es: un banco de pruebas, un conjunto fijo de posibles resultados del que obtenemos uno en cada observación y donde el conjunto de posibles resultados nos provee de una distribución de probabilidad. La cantidad de incertidumbre está relacionada con el grado de predictibilidad de un experimento aleatorio que presenta una distribución de probabilidad sobre los posibles resultados. La medida de incertidumbre es una medida de concentración de la distribución de probabilidad: en el caso de que dicha distribución de probabilidad esté concentrada entorno a un valor, el resultado del experimento es más predecible, lo que significa que la incertidumbre del posible resultado es menor. En caso contrario, la distribución de probabilidad está poco concentrada -más dispersa- el resultado del experimento es menos predecible, lo que implica que la incertidumbre sobre el posible resultado es mayor.

La caracterización matemática del grado de concentración de la distribución de probabilidad se planteó en el primer cuarto del siglo XX mediante el principio de transferencia de la probabilidad entre sucesos: la distribución de probabilidad debía cambiar cuando transferimos una parte de la probabilidad de un suceso a otro. Si la transferencia³⁷⁵ es de un suceso cuya distribución de probabilidad está más concentrada a otro suceso con la distribución menos concentrada, entonces el grado de incertidumbre del primer suceso aumentará y el del segundo disminuirá. La cuestión central para comparar distribuciones de

³⁷⁵Más concretamente, si la cantidad transferida es menor de la mitad de la diferencia de probabilidad entre los dos sucesos.

probabilidad es que este método nos aporta la posibilidad de conseguir una distribución de probabilidad transfiriendo probabilidad desde otra.

Si tras una serie de transferencias, una distribución de probabilidad R se puede obtener a partir de una distribución de probabilidad T , se dice que T mayoriza a R ($T \prec R$). Así, con esta herramienta, en teoría podríamos comparar el grado de concentración y por lo tanto la cantidad de incertidumbre. El problema es que hay distribuciones de probabilidad que no admiten mayorización. No obstante, la noción de mayorización condujo al concepto de medida de incertidumbre denominada Schurconcavidad³⁷⁶ aunque, como hemos apuntado, el hecho de que la mayorización no fuera una operación estricta de orden, convertía a la Schurconcavidad en una condición necesaria pero no suficiente para caracterizar cualquier medida de la incertidumbre.

La medida del contenido de incertidumbre o información que vamos a utilizar fue introducida en el marco tecnológico de las comunicaciones por Claude Shannon con el nombre de “Teoría matemática de la comunicación” [Shannon, 1948] que, posteriormente, fue publicada en forma de libro en el que se incluía un prólogo de Warren Weaver [Shannon, 1949]. La teoría de Shannon se ocupa de la precisión con que se transmiten los símbolos entre dos lugares en el tiempo.

Se puede exponer el trabajo de Shannon desde dos puntos de vista: en el enfoque técnico operacional se pregunta por la cantidad de bits que son necesarios para almacenar la salida de una fuente, de tal suerte que ésta se pueda recuperar con confianza. Como teoría matemática, en la que ahora estamos interesados, la incertidumbre y la información son parte de la teoría de las probabilidades y trata de la relación entre las distribuciones de probabilidad de dos conjuntos de eventos y su distribución de probabilidades condicionales. El enfoque que vamos a seguir en este apartado es puramente matemático: enunciar los axiomas necesarios y suficientes que debe cumplir una medida de incertidumbre y encontrar la función que la satisface.

La medida de incertidumbre de Shannon fue axiomatizada por Khinchin y se puede presentar de distintas maneras [Klir, 2006, pp. 71-77]³⁷⁷:

El experimento aleatorio consta de una fuente que produce mensajes independientes entre ellos y cada uno con una distribución de probabilidad constante. Esta fuente la suponemos estacionaria, esto significa que la distribución de probabilidad es invariante en el tiempo. La descripción matemática de un experimento aleatorio requiere fijar el espacio de probabilidad que consta de tres elementos: el espacio muestral Ω , que es el conjunto de todos los resultados posibles del experimentos, una σ -álgebra \mathcal{A} ³⁷⁸ y una medida de probabilidad

³⁷⁶Una función $f(T) = f(p_1, p_2, \dots, p_n)$ con p_n probabilidades entre las que se realiza la transferencia, se dice Schurconcava si $T \prec R \rightarrow f(T) \geq f(R)$.

³⁷⁷Para un estudio crítico de la entropía de Shannon como medida de incertidumbre, se puede consultar [Uffink, 1990, pp. 65-87].

³⁷⁸Sea una familia de \mathcal{A} de subconjuntos de Ω , dicha familia es una σ -álgebra si se satisfacen los siguientes axiomas:

1. $\Omega \in \mathcal{A}$.

P sobre $\langle \Omega, \mathcal{A} \rangle$ ³⁷⁹. También se dice que una fuente se caracteriza por la citada terna: $\langle \Omega, \mathcal{A}, \mathcal{P} \rangle$.

Sin pérdida de generalidad, sea una variable aleatoria³⁸⁰ X que toma sus valores del conjunto discreto $\Omega := \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. La elección de uno de estos eventos elementales reportaría incremento de información - decremento de incertidumbre- en una cantidad que depende de la probabilidad de ese mensaje. Por lo tanto, si asociamos una distribución de probabilidad a dicha variable, $p_i = \text{Prob}(X = x_i)$, el conjunto de distribuciones de probabilidad será $P(X = x_i) := \{p_1, p_2, \dots, p_n\} = \{p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)\} \in \mathbb{R}^n$ con $\sum_i p_i = 1$ y $p_i \geq 0$.

Existe una única medida de incertidumbre para esta distribución de probabilidades $H(P(X)) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ que satisface los siguientes axiomas:

1. $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ es una función continua de sus argumentos, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$
2. $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ es aditiva: la entropía conjunta de dos sucesos aleatorios es menor o igual a la suma de las entropías de cada uno. La igualdad se obtiene en el caso de que los dos sucesos aleatorios sean independientes.
3. $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ es monótona creciente, es decir, cuando los sucesos son equiprobables se tiene más incertidumbre cuanto mayor es el número de sucesos.
4. $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ asociada a un proceso aleatorio es equivalente a la suma pesada de la cantidad de incertidumbre asociada a los subprocesos componentes. Es decir, la incertidumbre no depende de la secuencia y pasos en la que dividamos el proceso. En el argot técnico, no dependen del modo de ramificación.
5. La escala de medidas³⁸¹ de $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ se expresará en bits por el siguiente convenio de normalización: el incremento de información para dos mensajes con la misma probabilidad -bit- $H(P) = H(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) = 1$.

2. Si $A \in \mathcal{A}$ entonces $A^c \in \mathcal{A}$. Con A^c el complementario de A .

3. Cualquier familia finita numerable de $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ cumple que $\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}$.

³⁷⁹Por ejemplo la de Kolmogorov: Si tenemos el espacio muestral Ω de posibles resultados y $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ una σ -álgebra de subconjuntos de Ω , se dice que la función $P : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ es una medida de probabilidad si cumple las propiedades:

1. $P(A) \geq 0 \forall A \in \mathcal{A}$
2. se cumple la aditividad $P(\bigcup_i A_i) = \sum_i P(A_i)$ si A_i disjuntos.
3. $P(\Omega) = 1$.

³⁸⁰Recordemos que una variable aleatoria real X es una función que asocia cada resultado de los experimentos a los números reales $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ en el caso continuo y a los naturales en el caso discreto. Una propiedad importante de las variables aleatorias es que pueden condicionarse a otros eventos u otras variables aleatorias y para ellas existe la noción de independencia entre variables aleatorias.

³⁸¹El bit para base 2, el nat para base e y el Hartley para base 10.

La única medida que satisface los axiomas asociada a la distribución discreta de probabilidad $P(X = x_i) = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ con $\sum_i p(x_i) = 1$ es la *Entropía de Shannon*:

$$H(P(X)) := - \sum_i p_i \log p_i \geq 0 \quad (\text{B.5})$$

La *Entropía de Shannon* es por su forma matemática un funcional que sólo depende de la distribución de probabilidades $P(X)$ y no de los valores de los resultados de los experimentos x_i . Dicha entropía representa la cantidad de información que se espera obtener en promedio una vez realizado el experimento³⁸².

Esta medida de incertidumbre así definida es una función de todos los mensajes que podría emitir una fuente y no mide información de sucesos individuales, ni su contenido semántico. En este sentido, un mensaje individual sería informativo sólo en relación a que ha sido elegido de un conjunto de posibles mensajes.

A diferencia del caso discreto, el valor de la *Entropía de Shannon* para distribuciones de probabilidad continua depende de la elección de las coordenadas bajo las que describamos el mensaje. Por esta razón, sólo sería aceptable esta medida entrópica en el caso continuo si estamos interesados en las diferencias de entropía (información) que son independientes de las coordenadas. Por eso, parece que la entropía fundamental tiene un carácter relativo.

Es necesario resaltar que la importancia de la entropía de Shannon no descansa exclusivamente en su capacidad para medir la incertidumbre -existen otras medidas- sino en ser la única función que no entra en contradicción con los postulados que hemos presentado.

Por lo hasta aquí referido, la *Entropía de Shannon* forma parte de la teoría de las probabilidades y, en consecuencia, el problema de interpretación de la naturaleza de las probabilidades³⁸³ se extiende a la teoría de la información [Beisbart y Hartmann, 2011, pp. 115-143].

Si atendemos a la naturaleza de la fuente, en el caso de que ésta no sea intrínsecamente probabilística: la medida de la información de Shannon expresaría creencia del receptor. Desde el punto de vista de los subjetivistas, esta creencia sería individual por lo que

³⁸²Mostremos el cálculo de la entropía con el siguiente ejemplo: Sea la fuente con símbolos $\Omega = \{x_1, x_2, x_3\}$ del que toma sus valores la variable aleatoria X , la probabilidad de ocurrencia respectiva asociada es, $P(X) = \{p(x_1) = \frac{1}{2}, p(x_2) = p(x_3) = \frac{1}{4}\}$ la entropía de la fuente será: $H(P(X)) = - \sum_i p_i \log p_i = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + p_3 \log_2 p_3) = \frac{3}{2} \text{ bits}$.

³⁸³A diferencia de las axiomáticas relacionadas con la geometría, cuyo contenido de verdad es intuitivo, las probabilidades, cuya axiomatización presupone ciertas relaciones entre los elementos constitutivos, requieren de una interpretación que les dote de sentido -verdad- a la manera de Tarsky para constituir un modelo del espacio real. Podemos dividir las interpretaciones en:

1. Epistémicas: una medida del grado de creencia racional. Pueden ser tanto objetivas -los agentes con la misma evidencia asignan las misma probabilidad- como subjetivas -incluso con la misma evidencia puede ser asignada distintas probabilidades-.
2. Ónticas: las probabilidades forman parte intrínseca del mundo, -frecuentistas y propensionistas (tendencias o disposiciones de objetos o situaciones)-.

cambiaría para cada receptor. Para los objetivistas epistémicos $H(P(X))$ debería ser máxima para la distribución de probabilidad que asignan todos los agentes de forma racional. Esta interpretación se conoce como el Principio de Máxima Entropía de Jaynes. Para fuentes intrínsecamente probabilísticas u ónticas, el *principal principle*³⁸⁴ establece que la creencia de que ocurra un suceso debe ser igual a su probabilidad óntica. Así, las probabilidades para cada x_i deben ser iguales a las probabilidades ónticas de la fuente y, por lo tanto, la medida de información refleja una propiedad objetiva de la fuente.

En resumen: la *Teoría de la Información de Shannon* es una teoría cuantitativa, sintáctica y no semántica. Es una teoría sobre medias, es neutral respecto a cualquier teoría - en especial respecto a cualquier teoría física y sustrato físico-.

Esta medida de información es a la vez una forma de cuantificar la aleatoriedad de la fuente. Esta cuestión está íntimamente relacionada con una medida del orden o desorden relativo. Ésta suele ser la conexión que los textos presentan entre la entropía de Shannon y las entropías que presenta la mecánica estadística. Formalmente³⁸⁵ la entropía de Shannon se asemeja a la entropía de Gibbs³⁸⁶ donde $p(x_i)$ representaría la probabilidad de que el sistema termodinámico estuviera en el microestado i y la entropía representaría el promedio de esa probabilidad sobre todos los posibles microestados del sistema. Cuando todos los microestados son equiprobables y el sistema termodinámico permanece aislado, la entropía de Gibbs toma la forma de la entropía de Boltzman donde W es el número de los posibles microestados y $k_b = 1,380,610^{-23} J/K$:

$$S = k_B \ln W \quad (B.7)$$

Donde W representa la multiplicidad del macroestado - el número de posibles microestados (configuraciones), siendo estos equiprobables-. Por otro lado, si suponemos equiprobabilidad, la entropía de Shannon alcanza el valor máximo, lo que significa que la cantidad de orden en promedio se maximiza:

$$H_{max}(P(X)) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n = \frac{\ln n}{\ln 2} \quad (B.8)$$

Y podemos relacionar la entropía de Boltzman con la de Shannon de tal suerte que:

$$S = k_B \ln n = k_B \ln 2 H_{max}(P(X)) \quad (B.9)$$

Esta expresión hay que tomarla con cuidado porque, a pesar de que hemos interpretado las dos como una medida del valor medio del desorden, un aumento de entropía de Boltzman

³⁸⁴Es decir, si existe una probabilidad objetiva, la subjetiva debería coincidir con ella. Esto significa de facto una restricción para los agentes racionales.

³⁸⁵Seguimos la presentación de [Auletta y Wang, 2014, pp. 275-277].

³⁸⁶

$$H(P(X)) = -k_B \sum_i p_i \log p_i \quad (B.6)$$

implica un aumento de entropía de Shannon pero el caso contrario no se sigue de la misma forma³⁸⁷. De hecho, la entropía de Boltzmann cuantifica el desorden procedente de un intercambio dinámico de energía mientras que la de Shannon representa el grado de desorden de una secuencia de señales. Por esta razón, hay que ser muy cuidadoso al relacionar reversibilidad e irreversibilidad termodinámica con transferencia de información de Shannon³⁸⁸.

³⁸⁷Éste es el caso que presentan las relaciones de indeterminación de Heisenberg en torno a sistemas cuya temperatura se encuentra en torno al cero absoluto.

³⁸⁸Para una presentación detallada de la relación entre los distintos conceptos de información y entropía consultar [Wherl, 1978].

Bibliografía

- [Auletta y Wang, 2014] AULETTA, G. y WANG, S.Y. (2014). *Quantum Mechanics for thinkers*. Singapore: Pan Stanford Publishing.
- [Bacciagaluppi, 2016] BACCIAGALUPPI, G. (2016). *The Role of Decoherence in Quantum Mechanics*. The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2016 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2016/entries/qm-decoherence/>>.
- [Ballentine, 2000] BALLENTINE, L.E. (2000). *Quantum Mechanics: A Modern Development*. Singapore: World Scientific Publishing.
- [Barrett, 1999] BARRETT, J.A. (1999). *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*. Oxford: Oxford University Press.
- [Barrett y Burne, 2012] BARRETT, J.A. y BYRNE P. (edit.) (2012). *The Everett Interpretation of Quantum Mechanics: Collected Works 1955-1980 with Commentary*. Princeton: Princeton University Press.
- [Barrett, 2014] BARRETT, J.A. (2014). *Everett's Relative-State Formulation of Quantum Mechanics* Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <<https://leibniz.stanford.edu/friends/members/preview/qmeverett/>> [Consulta: 7 de diciembre de 2015].
- [Bartha, 2010] BARTHA, P. (2010). *By Parallel Reasoning* Oxford: Oxford University Press.
- [Beatty, 2016] BEATTY, J. (2016). *The Creativity of Natural Selection? Part I: Darwin, Darwinism, and the Mutationists* Journal of the History of Biology. December 2016, Volume 49, Issue 4, pp 659-684.
- [Beisbart y Hartmann, 2011] DICKSON, M. (2011). En: BEISBART, C. (edit.) *The Probabilities in Physics*. Oxford: Oxford University Press.
- [Bell, 1990] BELL, J. (1990). *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*. Madrid: Alianza Editorial.
- [Bertsekas y Tsitsiklis, 2008] BERTSEKAS, D.P. (2008). *Introduction to Probability*. Athena Scientific.

- [Black, 1962] BLACK, M. (1962). *Modelos y metáforas*. Trad.: V. Sánchez. Madrid: Tecnos.
- [Bohr, 1949] BOHR, N. (1949). *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*. En: Schlipp, P.A. (edit.) (1949). *Albert Einstein philosopher Scientist*. New York: MJF Books. Ver española en: Bohr, N. (1964). *Física atómica y conocimiento humano*. Trad.: Yusta, A. Madrid: Aguilar, pp 40-82.
- [Bohr, 1964] BOHR, N. (1964). *Física atómica y conocimiento humano*. Trad.: Yusta, A. Madrid: Aguilar.
- [Blume-Kohout y Zurek, 2005] BLUME-KOHOUT, R. y ZUREK, W.H. (2005). *Quantum Darwinism: Entanglement, Branches, and the Emergent Classicality of Redundantly Stored Quantum Information*, arXiv:quant-ph/0505031v2 13 Oct 2005.
- [Blume-Kohout y Zurek, 2006] BLUME-KOHOUT, R. y ZUREK, W.H. (2006). *Quantum Darwinism: Entanglement, branches, and the emergent classicality of redundantly stored quantum information*, Phys. Rev. A 73, 062310.
- [Bowler, 1990] BOWLER, P.J. (1990). *El hombre y su influencia*. Boston: Trad.: Rada, E. Madrid: Alianza editorial.
- [Brandon, 1990] BRANDON, R.N. (1990). *Adaptation and environment*. Princeton: Princeton University Press.
- [Bronowski, 1973] BRONOWSKY, J. (1973). *The Acent of Man*. Boston/Toronto: Little Brown and Company.
- [Browne, 2008] BROWNE, J. (2008). *Charles Darwin: el viaje*. Trad.: Hermoso, J. Valencia: Universidad de Valencia.
- [Brukner y Zeilinger, 2001] BRUKNER, C. y ZELINGER, A., (2001). *Conceptual inadequacy of the Shannon information in quantum measurements*. Physics Review A, 63, 022113.
- [Brunel y Nadal, 1998] BRUNEL, N. y NADAL, J.P. (1998). *Mutual information, Fisher information and population coding*. Neural Computation, Massachusetts Institute of Technology Press (MIT Press), 1998, 10 (7), pp.1731- 1757.
- [BUFFON, 1749] BUFFON, J.L.L (1749). *Histoire Naturelle, générale et particulière*,. L'imprimerie Royale, Paris. (Tomo I).
- [BUFFON, 1756] BUFFON, J.L.L (1756). *Histoire Naturelle, générale et particulière*,. L'imprimerie Royale, Paris. (Tomo V).
- [BUFFON, 1766] BUFFON, J.L.L (1766). *Histoire Naturelle, générale et particulière*,. L'imprimerie Royale, Paris. (Tomo VI).

- [Dür y Heusler, 2013] DÜR, W. y Heusler, S. (2013). *What can we learn about quantum physics from a single qubit*. arXiv:1312.1463 [physics.ed-ph].
- [Bustos, 2000] BUSTOS, E. (2000). *La metáfora: ensayos transdisciplinarios*. Fondo de Cultura Económica, 2000.
- [Butterfield y Earman, 2007] BUTTERFIELD, J. y EARMAN, J. (2007). *Philosophy of Physics*. Singapore: World Scientific Publishing.
- [Byrne, 2012] BYRNE, P. (2012) En: SAUNDERS, S. et al (2012). *Many Worlds?* Oxford: Oxford University Press.
- [Cadenas, 2004] CADENAS, Y. (2004). *Epistemología, Ontología y complementariedad en Niels Bohr*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- [Camilleri, 2009] CAMILLERI, K. (2009). *A history of entanglement: Decoherence and the interpretation problem..* Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 40(2009)290-302.
- [Campbell, 1965] CAMPBELL, D.T. (1965). *Variation and selective retention in socio-cultural evolution..* En: Herbert R. Barringer, George I. Blanksten and Raymond W. Mack (Eds.), *Social change in developing areas: A reinterpretation of evolutionary theory*, pp. 19-49. Cambridge, Massachusetts: Schenkman.
- [Cartwright, 1983] CARTWRIGHT, N., (1983). *How the Laws of Physics Lie*. New York: Oxford University Press.
- [Casado et al, 2002] CASADO, A.; et al. (2002). *Local Realism via the Wigner Function Formalism for PDC Light*. En: *Foundations of Quantum Physics*. Madrid: Anales de Física, Monografías.
- [Cassiniello, 1994] CASSINIELLO, A., (1994). *La interpretación de los muchos universos de la mecánica cuántica: apuntes históricos*. Arbor, N° 584, 47-68.
- [Cassiniello, 1996a] CASSINIELLO, A., (1996.a). *La interpretación de los muchos universos. Probabilidad y entropía en mecánica cuántica*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- [Cassiniello y Sánchez-Gómez, 1996.b] CASSINIELLO, A. y SÁNCHEZ-GÓMEZ, J.L. (1996b). *On the Probabilistic postulate of Quantum Mechanics* Foundations of Physics vol.26, N° 10.
- [Castrodeza, 1988] CASTRODEZA, C. (1988). *La Teoría Histórica de la Selección Natural*. Madrid: Alhambra.
- [Castrodeza, 2013] CASTRODEZA, C. (2013). *La Razón de Ser. Meditaciones darwinianas*. Madrid: Xorki.

- [Chaitin, 1966] CHAITIN, G.J. (1966). *On the Length of Programs for Computing Finite Binary Sequences*. J. Association for Computing Machinery, v. 13, No. 4, pp. 547-569.
- [Chen, 2018] CHEN, M. et al. (2018). *Emergence of Classical Objectivity of Quantum Darwinism in a Photonic Quantum Simulator*. Science Bulletin 64 (2019) 580-585.
- [Ciampini, 2018] CHAMPINI, M.A. et.al. (2018). *Experimental signature of quantum Darwinism in photonic cluster states*. Phys. Rev. A 98, 020101(R).
- [Cover y Thomas, 1991] COVER, T.M. Y THOMAS, J.A. (1991). *Elements of Information Theory*. New York: John Wiley and Sons.
- [Dardashti, 2016] DARDASHTI, R. (2016). *Challenging scientific methodology: theory assessment and development in modern fundamental physics*. Dissertation, LMU München: Faculty of Philosophy, Philosophy of Science and the Study of Religion.
- [Darwin, 1839] DARWIN, C. (1839). *Journal of researches into the geology and natural history of the various countries visited by H.M.S. Beagle*. London: Colburn.
- [Darwin, 1846] DARWIN, C. (1846). *Geological observations on South America..* London: Stewart and Murray.
- [Darwin, 1859] DARWIN, C. (1859). *On the origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of favoured races in Struggle for Life*. London: John Murray.
- [Darwin, 1868] DARWIN, C. (1868). *The Variation of Animals and Plants Under Domestication*. London: John Murray.
- [Darwin, 1871] DARWIN, C. (1871). *The descent of man, and selection in relation to sex*. London: John Murray, vol I.
- [Darwin, 1872] DARWIN, C. (1872). *The origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of favoured races in Struggle for Life*. London: John Murray. 6th edition.
- [Darwin, 1887] DARWIN, C. (1887). *Life and letters*. London: John Murray.
- [Darwin, 1958] DARWIN, C. (1958). *Autobiography*. London: Collins.
- [Darwin, 2009] DARWIN, C. (2009). *On the origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of favoured races in Struggle for Life*. London: John Murray. Ed. Faxímil.
- [Darwin, 1794] DARWIN, E. (1794). *Zoonomia, the laws of organic life*. London: J. Jhonson.
- [Darwin, 1892] DARWIN, F. (1892). *Charles Darwin: his life told in an autobiographical chapter, and in a selected series of his published letters*. London: John Murray.
- [Dawkins, 1976] DAWKINS, F. (1976). *The selfish gene*. Oxford: Oxford University Press.

- [Dawkins, 1986] DAWKINS, F. (1986). *The Blind Watchmaker*. New York: W. W. Norton y Company.
- [de Beer, 1960B] DE BEER, G. (1960B). *Darwin's notebooks on transmutation of species. Part I. First notebook [B]*. Bulletin BMNH.
- [de Beer, 1960C] DE BEER, G. (1960C). *Darwin's notebooks on transmutation of species. Part II. First notebook [C]*. Bulletin BMNH.
- [de Beer, 1960D] DE BEER, G. (1960D). *Darwin's notebooks on transmutation of species. Part III. First notebook [D]*. Bulletin BMNH.
- [de Beer, 1960E] DE BEER, G. (1960E). *Darwin's notebooks on transmutation of species. Part IV. First notebook [E]*. Bulletin BMNH.
- [Dennett, 1995] DENNETT, D. (1995). *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. New York: Simon y Schuster.
- [Depew y Weber, 1995] DEPEW, D.J. y WEBER (1995). *Darwinism Evolving: System Dynamics and the Genealogy of Natural Selection*. London: MIT Press.
- [Desmond y Moore 2009] DESMOND, A. y MOORE J. (2009). *Darwin..* London: Penguin Books.
- [Devlin, Moore 1991] DEVLIN, K. (1991). *Logic and Information..*Cambridge: Cambridge University Press.
- [DeWitt y Graham, 1973] DEWITT, B.S. and GRAHAM, N. (eds.) (1973). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. New York: Princeton University Press.
- [Dieguez, 2012] DIEGUEZ, A. (2012). *La vida bajo escrutinio*. Biblioteca Buridan.
- [Dirac, 1958] DIRAC, P.A.M. (1958). *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford: Oxford University Press.
- [Dobzhansky, 1973] DOBZHANSKY, T. (1973). *Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution*. American Biology Teacher, 1.
- [Dobzhansky et al., 1980] DOBZHANSKY, T. et al. (1980). *Evolución*. Barcelona: Ediciones Omega.
- [Ellis, 2004] ELLIS, G.F.R. (2004). *True complexity and its associated ontology*. En: Barrow et al. (2004). *Science ultimate reality. Quantum theory, cosmology and complexity*. Camdridge: Cambridge University Press.
- [Everett, 1957a] EVERETT, H. (1957). 'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics, Review of Modern Physics/Vol. 29, No 3, 454-462.

- [Everett, 1957b] EVERETT, H. (1973). "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics, en De Witt, B.S. and Graham, N. (eds.) *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. New York: Princeton University Press.
- [Facci, 2010] FACCI, P. et al. (2010). *Classical and Quantum Fisher Information in the Geometrical Formulation of Quantum Mechanics*, Physics Letters A 374 (2010) 4801.
- [Faye, 2014] FAYE, J. (2014). *Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qm-copenhagen/>>, [Consulta: 15 abril de 2015].
- [Faye y Folse, 2017] FAYE, J. y FOLSE, H.J. (2017). *Niels Bohr and the philosophy of physics*. London: Bloomsbury academic.
- [Feynman et al., 1963] FEYNMAN, R.P; LEIGHTON, R.B.; SANDS, M. (1963). *The Feynman Lectures on Physics: Quantum Mechanics*. Reading, Massachusetts: Addison -Wesley, v.3.
- [Fine, 1973a] FINE, A. (1973a). *Probability and Quantum Mechanics*, British Journal for the Philosophy of Science, 24.
- [Fine, 1973b] FINE, A. (1973b). *The two problems of quantum measurement*. En: SUPPES, P (edit.) *Logic, Methodology and Philosophy of Science* , North-Holland, vol. IV , 567-581.
- [Fisher, 1922] FISHER, R.A. (1922). *On the interpretation of χ^2 from contingency tables, and the calculation of P*, Journal of the Royal Statistical Society 85 (1), 87-94.
- [Fisher, 1950] FISHER, R.A. (1950). *Contributions to mathematical statistics*. New York: Wiley.
- [Fisher, 1958] FISHER, R.A. (1958). *The genetic theory of natural selection*. New York: Dover.
- [Fisher, 1959] FISHER, R.A. (1959). *Statistical Methods and Scientific Inference*. London: Oliver and Boyd. 2nd Edition.
- [Floridi, 2010] FLORIDI, L. (2010). *Information. A very short introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- [Floridi, 2011] FLORIDI, L. (2011). *The Philosophy of information*. Oxford. Oxford University Press.
- [Frank, 2009] FRANK, S. A. (2009). *Natural selection maximizes Fisher information*. Journal of Evolutionary Biology. Volume 22, Issue 2.
- [Frank, 2012a] FRANK, S. A. (2012.a). *Natural selection. III. Selection versus transmission and the levels of selection*. Journal of Evolutionary Biology. Volume 25, 227-243.

- [Frank, 2012b] FRANK, S. A. (2012.b). *Natural selection. IV. The Price equation*. Journal of Evolutionary Biology. Volume 25, 1002-1019.
- [Frank, 2012c] FRANK, S. A. (2012c). *Natural selection. V. How to read the fundamental equations of evolutionary change in terms of information theory**. Journal of Evolutionary Biology. Volume 25, 2377-2396.
- [Frank, 2017] FRANK, S. A. (2017). *Universal expressions of population change by the Price equation: natural selection, information, and maximum entropy production*. Ecology and Evolution 7:3381-3396.
- [Frieden, 2004] FRIEDEN, B.R. (2004). *Science from Fisher Information: A Unification*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [Friedman, 1974] FRIEDMAN, M. (1974). *Explanation and Scientific Understanding* En The Journal of Philosophy, vol. 71, 1, 5-19.
- [Fuchs, 2007] FUCHS, C. (2007). *Subjective probability and quantum certainty* arXiv:quant-ph/0608190v2 26 Jan 200, [Consulta septiembre de 2015].
- [Fuchs , 2010] FUCHS, C. (2010). *QBism, the Perimeter of Quantum Bayesianism* URL:<http://arxiv.org/abs/1003.5209v1>, [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- [Galindo y Abellanas, 1991] GALINDO, A. y ABELLANAS, L. (1991). *Espacios de Hilbert*. Madrid: Ediciones de la Universidad Complutense de Madrid.
- [Galindo y Pascual, 1989] GALINDO, A. y PASCUAL, P. (1989). *Mecánica Cuántica*. Madrid: Ediciones de la Universidad Complutense de Madrid.
- [Galindo, 2001] GALINDO, A. (2001). *Del bit al qubit. Lección inaugural del Curso Académico 2001-2002*. Madrid: Ediciones de la Universidad Complutense de Madrid.
- [García, 2000] GARCÍA (2000). *Diccionario filosófico*. Oviedo: Pentalfa.
- [Gayon, 2009] GAYON, J. (2009). *From Darwin to today in evolutionary biology*. En: Hodge, y Radick, (2009). *The Cambridge Companion to Darwin*. London Cambridge University Press, second edition.
- [Gerlach y Stern, 1922] GERLACH, W. y STERN, O. (1922). *Das magnetische Moment des Silberatoms*, Zeitschrift für Physik 9: 353-355.
- [Giere, 1988] GIREE, R.N. (1988). *Explaining Science: A Cognitive Approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- [Giere, 2010] GIREE, R.N. (2010). *An agent-based conception of models and scientific representation*, Synthese, January 2010, 172-269.

- [Ginnobili, 2010] GINNOBILI, S. (2010). *La estructura de la Selección Natural*. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires.
- [Gleason, 1957] GLEASON, A. M. (1957). *Measures on the closed subspaces of a Hilbert space*, Indiana University Mathematics Journal 6: 885-893.
- [Godfrey-Smith, 2007a] GODFREY-SMITH, P. (2007.a). *Conditions for Evolution by Natural Selection*. Journal of Philosophy 104 :489-516.
- [Godfrey-Smith, 2007b] GODFREY-SMITH, P. (2007.b). *Is it a revolution?* Springer Science+Business Media B.V. 27 April 2007.
- [Godfrey-Smith, 2009] GODFREY-SMITH, P. (2009). *Darwinian Populations and Natural Selection*. Oxford: Oxford University Press.
- [Godfrey-Smith 2014] GODFREY-SMITH, P. (2014). *Philosophy of Biology*. Princeton: Princeton University Press.
- [Gould, 2004] GOULD, S.J. (2004). *La Estructura de la Teoría de la Evolución*. Tusquets, Barcelona.
- [González, 2000] GONZÁLEZ RECIO, J.L. (2000). *Filosofía de la Naturaleza: proyecto docente*, Universidad Complutense de Madrid.
- [González, 2004] GONZÁLEZ, J.L. (2004). *Teorías de la vida*, Madrid: Síntesis.
- [Grafen, 2009] GRAFEN A. (2009). *Formalizing Darwinism and inclusive fitness theory*. Phil.Trans. R.Soc.B. 364,3135-3141.
- [Guerra, 2013] GUERRA, I. (2013). *On quantum conditional probability*. Theoria, vol.28: 1.
- [Gutiérrez, 1992] GUTIÉRREZ, S. (1992). *Filosofía de la Probabilidad*. Valencia: Tirant lo Blanch.
- [Hamilton, 1964] HAMILTON, W.D. (1964). *The Genetical Evolution of Social Behaviour*. I J. Theoret. Biol. (1964) 7, 1-16.
- [Hamilton, 2009] HAMILTON, M.B. (2009). *Population Genetics*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- [Hardy, 2001] HARDY, L. (2001). *Quantum Theory From Five Reasonable Axioms*, arxiv.org/abs/quant-ph/0101012. [Consultada: 25 Sep 2001].
- [Haroche, 1998] HAROCHE, S. (1998). *Entanglement, Decoherence and the Quantum-Classical Boundary*. Physics Today 51(7), 36.
- [Harrigan y Spekkens, 2010] HARRIGAN, N. y SPEKKENS, R.W. (2010). *Einstein, incompleteness, and the epistemic view of quantum states*, Found. Phys. 40, 125, arXiv:0706.2661.

- [Hartley, 1928] HARTLEY, R.V.L. (1928). *Transmission of Information*, Bell System Technical Journal, Volume 7, Number 3, pp. 535-563, (July).
- [Hempel y Oppenheim, 1948] HEMPEL, C. Y OPPENHEIMER, P. (1948). *Studies in the Logic of Explanation.*, Philosophy of Science, vol.15, 135-175.
- [Hempel, 1976] HEMPEL, C. (1976). *La explicación científica*. Buenos Aires: Paidós.
- [Herbert, 1980] HERBERT, S. (1980). *The red notebook of Charles Darwin*. London: Bulletin BMNH.
- [Herschel, 1973] HERSCHEL, J. F.W. (1973). *A preliminary discourse on the study of Natural Philosophy*. Chicago: The University of Chicago Press.
- [Hesse, 1966] HESSE, M. (1966). *Models and Analogies in Science*. Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1966.
- [Hodge, 2009] HODGE, J. (2009). *The notebook programmes and projects of Darwin's London years*. En: Hodge, J y Radick, G. (2009) *The Cambridge Companion to Darwin*. London: Cambridge University Press, second edition.
- [Hodgson et al., 2008] HODGSON, G. (2008). *In Defence of Generalised Darwinism*. Journal of Evolutionary Economics. 18. 577-596.
- [Holevo , 1998] HOLEVO, A.S. (1998). *Quantum coding theorems*. Russian Mathematical Surveys 53 (6), 1295.
- [Huang y Zhang, 2019] HUANG, W. y Zahng, K. (2019). *Approximations of Shannon Mutual Information for Discrete Variables with Applications to Neural Population Coding*. Entropy 2019, 21(3), 243.
- [Hughes, 1992] HUGHES, R.I.G. (1992). *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- [Hull, 1980] HULL, D.L. (1980). *Individuality and Selection*. Annual Review of Ecology and Systematics 11: 311-332.
- [Hull, 1985] HULL, D.L. (1985). *Darwinism as a Historical Entity: A Historiographic Proposal* . En Kholn, D. (1985). *Darwinian Heritage* . Princeton: Princeton University Press.
- [Huxley, 1860] HUXLEY, T.H. E.(1860). *Darwin sobre el Origen de las especies*, Westminster Review, p.569.
- [Huxley, 1965] HUXLEY, J.(1965). *La Evolución Síntesis Moderna*. Trad: Jiménez, F. Buenos Aires: Losada.
- [Jacob, 1970] JACOB, F. (1970). *La Logique du vivant, une histoire de l'hérédité*. París: Gallimard.

- [Jahn et al., 1989] JAHN, I. et al. (1989). *Historia de la Biología*. Trad.: J Gil. Barcelona: Labor.
- [Jammer, 1999] JAMMER, M. (1999). *Concepts of Force: a study in the foundations of dynamics*. New York : Dover.
- [Janssen, 2008] JANSSEN, H. (2008). *Reconstructing Reality*. Master Thesis, Radboud University Nijmegen.
- [Jenkin, 1867] JENKIN, F. (1867). *Review of The origin of species*. The North British Review 46 (June): 277-318.
- [Joos et al., 2003] JOSS, E. et al. (2003). *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*. Berlin: Springer.
- [Juthe, 2005] JUTHE, A. (2005). *Argument by Analogy*. Argumentation 19 (1):1-27.
- [Kant, 2011] KANT, I. (2011). *Crítica de la razón pura*. Trad.: Caimi, M. Mexico D.C.: Fondo de Cultura Económica.
- [Kastner, 2014a] KASTNER R. (2014.a). *The Emergence of Spacetime: Transactions and Causal Sets* En: Licatai. (ed.), *Beyond Peaceful Coexistence: The Emergence of Space, Time and Quantum*, World Scientific, London.
- [Kastner, 2014b] KASTNER R. (2014.b). *Einselection of pointer observables: the new H-theorem*. History and Philosophy of Modern Science, Part A, vol. 48, pp. 56-58, 2014.
- [Keynes, 1921] KEYNES J.M. (1921). *A Treatise on Probabilities*. London: Macmillan.
- [Kitcher, 1993] KITCHER, P. (1993). *The Advancement of Science: Science without Legend, Objectivity without Illusions*. Nueva York: Oxford University Press.
- [Klir, 2006] KLIR, G.J. (2006). *Uncertainty and Information: foundations of generalized information theory*. New Jersey: John Wiley and Sons.
- [Kolmogorov, 1965] KOLMOGOROV, A.N. (1965). *Three approaches to the quantitative definition of information*, Problems of Information Transmission, No. 1, pp. 3-11.
- [Kovachy et al., 2015] KOVACHY, A.N. (2015). *Quantum superposition at the half-metre scale*, Nature 16155.
- [Lamarck, 1986] LAMARK (1986). *Filosofía Zoológica*. Trad.: González, J. Barcelona: Alta Fulla.
- [Landauer, 1991] LANDAUER, R. (1991). *The Physical Character of Information*. Physics Today, mayo.

- [Landsman, 2007] LANDSMAN, N.P. (2007). *Between Classical and Quantum*. En: BUTTERFIELD, J. y EARMAN, J.(edit.) (2007). *Philosophy of Physics*. Amsterdam: Elsevier, 417-555.
- [Landsman, 2017] LANDSMAN, K. (2017). *Foundations of Quantum Theory*. Heidelberg: Springer Open.
- [Laplace, 1947] LAPLACE, P.S. (1947). *Ensayo filosófico sobre las probailidades*. Trad.: A.B. Besio. y J. Banfi. Buenos Aires: Espasa Calpe.
- [Leifer, 2014] LEIFER, M.S. (2014). *Is the quantum state real? An extended review of ψ -ontology theorems*. *Quanta* 2014; 3:67-155.
- [Lennox, 2001] LENNOX, J. (2001). *Darwinismo*. En: The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2019 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/darwinism/>>.Última [consulta junio de 2019].
- [Levins y Lewontin, 1985] LEVINS, R. y LEWONTIN, R.C. (1985). *The dialectical biologist*. Boston: Harvard University Press, 1985.
- [Lewontin, 1998] LEWONTIN, R.C. (1998). *Genes, organismos y ambiente. Las relaciones de causa y efecto en biología*. Barcelona: Gedisa.
- [Lockwood, 1996] LOCKWOOD, M. (1996). *'Many Minds' Interpretations of Quantum Mechanics*. *British Journal for the Philosophy of Science* 47 (2):159-188.
- [Lovejoy, 1983] LOVEJOY, A. (1983). *La gran escala del ser*. Barcelona: Icaria.
- [Luque, 2017] LUQUE, V.J. (2017). *On the equation to rule them all: a philosophical analysis of Price equation*. *Biology and Philosophy*.
- [Lyell, 1832] LYELL,C. (1832). *Principles Of Geology*. vol. 2, London: John Murray.
- [Lyell, 1854] LYELL,C. (1854). *Principles Of Geology*. vol. 2, London: John Murray.
- [Malthus, 1993] MALTHUS, R. (1993). *Primer ensayo sobre la población*. Trad.: Patricio de Azcárate. Madrid: Altaya.
- [Marraud, 2013] MARRAUD, H. (2013). *Análisis y evaluación de argumentos*. Madrid: Cátedra.
- [Martínez, 2002] MARTÍNEZ, A. (2002). *An Introduction to Semiclassical and Microlocal Analysis*. New York: Springer.
- [Maudlin, 1995] MAUDLIN, T. (1995). *Three measurement problems*, *Topoi*, 14: 7-15.

- [Maudlin, 2019] MAUDLIN, T. (2019). *Philosophy of Physics: Quantum Theory*, Princeton: Princeton University Press.
- [Maxwell, 1965] MAXWELL, J.C. (1965). *The Scientific Papers*, vol II. New York: Dover.
- [Maynard, 2000] MAYNARD, J. (2000). *The concept of information in biology*. *Philosophy of Science* . 67:214-218.
- [Mayr, 1988] MAYR, E. (1988). *Towards a new philosophy of biology*. New York: Harvard University Press.
- [Mayr, 1991] MAYR, E. (1991). *Una larga controversia*. Trad: Casado, S. Crítica, Barcelona.
- [McGinn, 2000] MCGINN, C. (2000). *Logical properties*. Oxford: Clarendon Press.
- [Mayr, 1999] MICHOD, R.E. (1999). *Darwinian dynamics*. Princeton: Princeton University Press.
- [Michod, 2001] MAYR, E. (2001). *The Philosophical Foundations of Darwinism* Proceedings of the American Philosophical Society vol. 145, nº 4, Diciembre.
- [Moffatt, 2016] MOFFATT, B. (2016). *The Philosophy of Biological Information*. En: Floridi, L. (2016) *The Routledge Handbook of Philosophy of Information*. Routledge.
- [Mohrhoff, 2004] MOHRHOFF, U. (2004). *Probabilities from envariance* International Journal of Quantum Information 2(2), 221-230.
- [Morgan y Morrison, 1999] MORGAN, M.S. y MORRISON, M. (ed.) (1999). *Models as Mediators*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [Morgan, 1921] MORGAN, T.H. (1921). *Evolución y Mendelismo*. Trad.: Zulaeta, A. Madrid: Calpe.
- [Morrison, M. 2016] MORRISON, M. (2016). *Models and theories*. En: HUMPHREYS, P. (ed.). *Philosophy of Science*. New York: Oxford University Press, 378-397.
- [Murdoch, 1987] MURDOCH, D. (1987). *Niels Bohr's philosophy of physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [Naimark, 1943] NAIMMARK, M.A. (1943). *On a representation of additive operator valued set functions (in Russian)*, DAN SSSR 41: 373-375.
- [Newton, 1977] NEWTON, I. (1977). *Óptica*. Trad.: Solís, C. Madrid: Alfaguara.
- [Nowak, 2006] NOWAK, M.A. (2006). *Evolutionary Dynamics*. Cambridge Massachusetts: Harvard University Press.

- [Nuño, 2005] NUÑO, L. (2005). *Historia filosófica de la idea de forma orgánica*. DEA. Universidad Complutense de Madrid.
- [Nuño, 2011] NUÑO, L. (2011). *El concepto de forma en la biología contemporánea*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- [Nielsen y Chuang, 2000] NIELSEN, M.A. y CHUANG, I.L. (2000). *Quantum Computation and Information*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [Ohya y Petz, 1993] OHYA, M. y PETZ, D. (1993). *Quantum Entropy and Its Use..* Heidelberg: Springer.
- [Okasha, 2006] OKASHA, S. (2006). *Evolution and the levels of selection*. Oxford: Oxford University Press.
- [Okasha, 2007] OKASHA, S. (2007). *Cultural Inheritance and Fisher's 'Fundamental Theorem' of Natural Selection*. Biological Theory 2 (3):290-299.
- [Olliver, Poulin y Zurek, 2005] OLLIVER, H. O.; POULIN, D. y ZUREK, W.H. (2005). *Environment as a Witness: Selective Proliferation of Information and Emergence of Objectivity in a Quantum Universe* Phys. Rev. A 72, 042113.
- [Omnès, 1994] OMNÈS, R. (1994). *Interpretation of quantum mechanics*. Princeton: Princeton University Press.
- [Paley, 1802] PALEY, W. (1802). *Natural Theology, or Evidences of the Existence and Attributes of the Deity collected from the Appearances of Nature*. Philadelphia: John Morgan.
- [Penrose, 2006] PENROSE, R. (2006). *El camino de la realidad*. Trad.: García, J. Madrid: Debate.
- [Plotkin, 1993] PLOTKIN, H. (1993). *Darwin machines and the nature of knowledge..* Cambridge: Harvard University Press.
- [Price, 1970] PRICE G.R. (1970). *Selection and covariance*. Nature, London 227, 520-1.
- [Price, 1972] PRICE G.R. (1972). *Extension of covariance selection mathematics*, Ann. Hum. Genet., Lond. (1972), 35, 485.
- [Pusey, Barrett y Rudolph, 2012] PUSEY, M.F, BARRETT, J. y RUDOLPH, T. (2012). *On the reality of the quantum state*. Nature Physics, Volume 8, Issue 6, pp. 476-479.
- [Quine, 2001] QUINE, W.V.O. (2001). *Palabra y objeto*. Trad.: Sacristán, M. Barcelona: Herder.
- [Rényi, 1961] RENYI, A. (1961). *On Measures of Entropy and Information*, Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob. Proc. Fourth Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob., Vol. 1 (Univ. of Calif. Press, 1961), 547-561.

- [Rioja, 1992] RIOJA, A. (1992). *La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza*, Revista de filosofía, ISSN 0034-8244, N° 8, 1992, págs. 257-282.
- [Rioja, 1995] RIOJA, A. (1995). *Los Orígenes del Principio de Indeterminación*, Theoria. Segunda Época, vol X, N° 22, 117-143.
- [Rioja, 2017] RIOJA, A. (2017). *Niels Bohr and the Philosophy of Physics: Twenty-first-century Perspectives*, International Studies in the Philosophy of Science, 31:4, 429-432.
- [Rivadulla, 2004] RIVADULLA, A. (2004). *Éxito, Razón y Cambio en Física. Un enfoque instrumental en teoría de la ciencia*. Madrid: Trotta.
- [Rivadulla, 2006] RIVADULLA, A. (2006). *Metáforas y modelos en ciencia y filosofía*. Revista de Filosofía, vol. 31, num. 2, 2006, pp. 189-202.
- [Rivadulla, 2015] RIVADULLA, A. (2015). *Meta, método y mito en ciencia*. Madrid: Trotta.
- [Rossi, 1979] ROSSI, P. (1979). *I segni del tempo: storia della Terra e storia delle nazioni da Hooke a Vico..* Milán: Feltrinelli.
- [Ruse, 1979] RUSE, M. (1979). *Filosofía de la Biología*. Madrid: Alianza Editorial.
- [Ruse, 1986a] RUSE, M. (1986.a). *La revolución darwinista*. Trad.: C. Castrodeza. Madrid: Alianza.
- [Ruse, 1986b] RUSE, M. (1986.b). *Tomándose a Darwin en serio..* Madrid: Salvat.
- [Sambursky, 2009] SAMBURSKY, S. (2009). *El Mundo Físico a Finales de la Antigüedad*. Madrid: Alianza.
- [Sauders et al., 2010] SAUNDERS, S. et al. (2010). *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, Reality*. Oxford: Oxford University Press.
- [Schlosshauer y Fine, 2005] SCHLOSSHAUER, M. y FINE, A. (2005). *On Zurek's derivation of the Born rule* Found. Phys. 35(2), 197-213.
- [Schlosshauer, 2005] SCHLOSSHAUER, M. (2005). *Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics*. Rev. Mod. Phys. 76, 1267.
- [Schlosshauer, 2007] SCHLOSSHAUER, M. (2007). *Decoherence. And The Quantum to Classical Transition*. Berlin: Springer.
- [Schlosshauer y Fine, 2007] SCHLOSSHAUER, M. y FINE, A. (2007). *Decoherence and the foundations of quantum mechanics*. En: Evans, J. y Thorndike, A.S. *Quantum Mechanics at the Crossroads*. Heidelberg: Springer.
- [Schlosshauer, 2011] SCHLOSSHAUER, M. (2011). *Elegance and enigma. The quantum interviews*. Berlin: Springer.

- [Schlosshauer y Camilleri, 2011] SCHLOSSHAUER, M. y CAMILLERI, A. (2011). *What classicality? Decoherence and Bohr's classical concepts* Advances in Quantum Theory AIP Conf. Proc. 1327, 26-35.
- [Schrödinger, 1935] SCHÖDINGER, E. (1935). *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*. Die Naturwissenschaften, 23: 808-812; 823-850.
- [Schrödinger, 1952] SCHÖDINGER, E. (1952). *Are there quantum jumps?*, British Journal for the Philosophy of Science 3 (11):233-242.
- [Shannon, 1948] SHANNON, C. (1948). *Mathematical theory of Communications*. Bell System Technical Journal, vol 27 pp. 379-423 y 623-656.
- [Shannon, 1949] SHANNON, C., WEAVER, W., (1949). *Mathematical theory of Communications*. University of Illinois Press. Urbana, (1949). Trad.: Bethencourt, T. (1981) *Teoría matemática de la comunicación*. Madrid: Ediciones Forja.
- [Sloan, 2009] SLOAN, P.R. (2009). *The making of a philosophical naturalist*. Hodge, J y Radick, G. *The Cambridge Companion to Darwin*. London: Cambridge University Press, second edition.
- [Solís y Sellés, 2008] SOLÍS, C. y SELLÉS, M. (2008). *Historia de la Ciencia*. Madrid, Espasa Calpe.
- [Stadler, 2010] STADLER, F. (2010). *El Círculo de Viena. Empirismo lógico, ciencia, cultura y política*. México D.C., Fondo de Cultura Económica.
- [Sterelny y Griffiths, 1999] STERELNY, K. Y y GRIFFITHS, P.E. (1999). *Sex and Death. An introduction to Philosophy of Biology*. Chicago. University of Chicago Press.
- [Stinespring, 1955] STINESPRING, W. F. (1955). *Positive Functions on C*-algebras*, Proceedings of the American Mathematical Society, 211-216.
- [Strocchi, 2005] STROCCHI, F. (2005). *Mathematical Structure of Quantum Mechanics*. Singapore: World Scientific.
- [Suárez, 1995] SUÁREZ, M. (1995). *The tool box of science: Tools for the building of models with a superconductivity example*. En Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities, vol. 44, 137-149.
- [Suárez, 1997] SUÁREZ, M. (1997). *Models of the World, Data-models and the Practice of Science: the Semantics of Quantum Theory*. PHD Thesis, London University.
- [Suárez, 1999] SUÁREZ, M. (1999). *The Role of Models in the Application of Scientific Theories: Epistemological Implications*. En: Morgan y Morrison (1999), pp. 168-196.

- [Suárez, 2000] SUÁREZ, M. (2000). *The Many Faces of Non-Locality: Dickson on the Quantum Correlations*. British Journal for the Philosophy of Science, vol. 51, no.4, pp. 882-892.
- [Suárez , 2003] SUÁREZ, M. (2003). *Scientific representation: Against similarity and isomorphism*. International studies in the philosophy of science 17, 3, 225-244.
- [Suárez, 2004] SUÁREZ, M. (2004). *Quantum Selections, Propensities and the Problem of Measurement*. British Journal for the Philosophy of Science, 55, 2, pp. 219-255.
- [Suárez, 2005] SUÁREZ, M. (2005). *Procesos causales, realismo y mecánica cuántica*. Enrahonar 37, 141-168.
- [Suárez y Cartwright, 2008] SUÁREZ, M. y CARTWRIGHT, N. (2008). *Theories: Tools Versus Models*. History and Philosophy of Science Part B Studies In History and Philosophy of Modern Physics 39(1).
- [Suárez, 2009] SUÁREZ, M.(ed.) (2009). *Fictions in Science: Philosophical Essays on Modeling and Idealization*. Abingdon: Routledge.
- [Suárez, 2016] SUAREZ, M. (2016). *Representation in Science*. En: HUMPHREYS, P (ed.). *Philosophy of Science*. New York: Oxford University Press, 440-459.
- [Suárez, 2019] SUAREZ, M. (2019). *Filosofía de la Ciencia. Historia y Práctica*. Madrid: Tecnos.
- [Suloway, 1982] SULLOWEY, F. (1982). *Darwin and His Finches: The Evolution of a Legend*. Journal of the History of Biology, 15 (1982):1-53.
- [Sydow, 2012] SYDOW, M. von (2012). *From Darwinian Metaphysics towards Understanding the Evolution of Evolutionary Mechanisms*. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen.
- [Timpson, 2013] TIMPSON, C.G. (2013). *Quantum Information Theory and the Foundations of Quantum Mechanics*. Oxford: Oxford University Press.
- [Trivers, 1971] TRIVERS, R.I. (1971). *The Evolution of Reciprocal Altruism*. Quarterly Review of Biology 46 (1):35-57.
- [Uffink, 1990] UFFINK, J.B.M (1990). *Measures of Uncertainty and the Uncertainty Principle*. Tesis Doctoral, Universidad de Utrecht.
- [Unden, 2019] UNDEN, T.K. et.al (2019). *Revealing the Emergence of Classicality Using Nitrogen-Vacancy Centers*. Phys. Rev. Lett. 123, 140402.
- [Valentini, 2010] VALENTINI, A. (2010). En Saunders, S. et al (2012). *Many Worlds?* Oxford: Oxford University Press, 476-509.

- [Vicente, 2008] VICENTE, J. de (2008). *Medidas de información, incertidumbre y entrelazamiento en Mecánica Cuántica*, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid. Madrid.
- [van Fraassen, 1991] VAN FRASSEN, B.C. van (1991). *Quantum Mechanic. And Empiricist View*. Oxford: Clarendon Press.
- [van Fraassen, 1996] VAN FRASSEN, B.C. van (1996). *La imagen científica*, Trad.: MARTÍNEZ, S. Mexico D.F.: Paidós (UNAM).
- [von Neumann, 1932] VON NEUMANN, J. (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer. Trad: Ortiz, R. (1991) *Fundamentos de mecánica cuántica* . Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2ª Edición.
- [von Sydow, 2012] VON SYDOW, J. (2012). *From Darwinian Metaphysics towards understanding the evolution of evolutionary mechanisms*. Göttingen: Göttingen Universitätsverlag.
- [Wallace, 2008] WALLACE, D. (2008). En RICKLES, D. (edit.) (2008). *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics*. Aldershot: Ashgate Publishing Limited.
- [Wallace, 2012a] WALLACE, D. (2012.a). En Batterman, D. (edit.) *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. Oxford: Oxford Universty Press.
- [Walker, 2012b] WALKER, S.C. (2012.b). *Derivation of the continuous-time Price equation*.<https://steven-carlisle-walker.wordpress.com/2012/06/26/derivation-of-the-continuous-time-price-equation/>». [Última consulta, 18 de junio 2019].
- [Weitzenfeld, 1984] WEITZENFEL, J.S. (1984). *Valid reasoning by analogy*. philosophy of Science, 51 (1) pp. 137-149.
- [Weissmann,1909] WEISMANN, A. (1909). En: Seward, A.C. (edit.) *Darwin and Modern Science*. Cambdridge: Cambdridge Universty Press, pp 16-66.
- [Wheeler, 1957] WHEELER, J.A. (1957). *Assessment of 'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics*, Review of Modern Physics/ vol. 29, 3, 463-465.
- [Wheeler y Zurek, 1983] WHELLER, J. A. y ZUREK, W.H. (1983). *Quantum Theory and Measurement*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- [Wheeler, 1990] WHELLER, J. A. (1990). *Information, Physics, Quantum: The Search for Links*. En Zurek,W.H (edit.) (1990). *Complexity, entropy and the physics of information*. Santa Fe: Westview Press.
- [Wheeler, 1992] WHEELER, J.A. (1992). *At home in the Universe*. New York: AIP Press.

- [Wheeler, 1998] WHEELER, J.A. (1998). *Geons, Black Holes and Quantum Foam. A life in Physics*. New York: Northon Company.
- [Wherl, 1978] WHERL, A. (1978). *General properties of Entropy*. Review of Modern Physics, vol 50, 21-260.
- [Wiener, 1964] WIENER, N. (1964). *God yGolem, Inc.: A Comment on Certain Points Where Cybernetics Impinges on Religion*. Cambridge: MIT Press.
- [Wigner,1963] WIGNER, P.W. (1963). *Symmetries and Reflections*. Woodbridge, Connecticut: Ox Bow Press.
- [Williams, 1970] WILLIAMS, M.B. (1970). *Deducing the Consequences of Evolution: a Mathematical Model*. J. Theor. Biol. 29:343-85.
- [Williams, 1992] WILLIAMS, G.C. (1992). *Natural Selection: Domains, Levels, and Challenges*. New York: Oxford University Press.
- [Wineland et al., 2003] WINELAND, D.J. et al. (2003). *Quantum information processing with trapped ions*. Philosophical Transactions A, julio.
- [Winsor, 2006] WINSOR, M.P. et al. (2006). *The Creation of the Essentialism Story: An Exercise in Metahistory*. History and Philosophy of the Life Sciences Vol. 28, No. 2 (2006), pp. 149-174.
- [Winther, 2016] WINTHER, R.G. (2016). *The Structure of Scientific Theories*. En: The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Edward N. Zalta (ed.), <<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/structure-scientific-theories/>>, [Consulta: abril de 2017].
- [Woodward, 2017] WOODWARD, J. (2017). *Scientific Explanation*. En: The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2017 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/scientific-explanation/>>, [Consulta: abril de 2017].
- [Wootters y Zurek, 1979] WOOTTERS, W.K. y ZUREK, W.H. (1979). *Complementarity in the double-slit experiment: quantum nonseparability and a quantitative statement of Bohr's principle*. Phys. Rev. D 19, 473-484.
- [Wootters y Zurek, 1982] WOOTTERS, W.K. y ZUREK, W.H. (1982). *A Single Quantum Cannot be Cloned*. Nature. 299: 802-803.
- [Zeh, 1970] ZEH, H.D. (1970). *On the interpretation of measurement in quantum theory*. En: Wheeler, J.A. y Zurek, W.H. (1983) *Quantum Theory and measurement*. Princeton: Princeton University Press.

- [Zeh, 2005] ZEH, H.D. (2005). *Roots and Fruits of decoherence* En Duplantier et al. *QUANTUM DECOHERENCE*. Heidelberg: Springer.
- [Zeilinger, 1999] ZEILINGER, A. (1999). *A Foundational Principle for Quantum Mechanics* Volume 29, Issue 4, pp 631-643.
- [Zinkernagel, 2011] ZINKERNAGEL, H. (2011). *Some trends in the philosophy of physics*. Theoria, 71 215-24.
- [Zinkernagel, 2016] ZINKERNAGEL, H. (2016). *Niels Bohr on the wave function and the classical/quantum divide*. Studies in History and Philosophy of Modern Physics, Vol. 53, 2016: arXiv:1603.00353 [physics.hist-ph] 1-19.
- [Zukowski et al., 1993] ZUKOWSKI, M., ZEILINGER, A., HORNE, M.A. y EKERT, A.K., *Event-Ready-Detectors' Bell Experiment via Entanglement Swapping* Physical Review Letters 71, 4287-4290.
- [Zurek, W.H., 1981] ZUREK, W.H. (1981). *Pointer basis of quantum apparatus: Into what mixture does the wave packet collapse?*, Physical Review D, 24:1516-1525.
- [Zurek, 1982] ZUREK, W.H. (1982). *Environment-induced superselection rules*, Physical Review D, 26:1862-1880.
- [Zurek, 1983] ZUREK, W.H. (1983). *Information Transfer in Quantum measurements*. En MESTRE, P. y SCULLY, M.O. (edit.) (1983). *Quantum Optics, Experimental Gravity, and the Measurement Theory*. New York: Plenum.
- [Zurek, 1990] ZUREK, W.H. (edit.) (1990). *Complexity, entropy and the physics of information*. Santa Fe: Westview Press.
- [Zurek, 1991] ZUREK, W.H. (1991). *Decoherence and the Transition from Quantum to Classical*. Physics Today 44, 10, 36.
- [Zurek, 1993] ZUREK, W.H. (1993). *Preferred states, predictability, classicality and the environment-induced decoherence*, Progress in Theoretical Physics 89, 281-312.
- [Zurek, 1998] ZUREK, W.H. (1998). *Decoherence, Einselection, and the Existential Interpretation (the Rough Guide)*. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A356:1793-1820, 1998.
- [Zurek, 2000] ZUREK, W.H. (2000). *Einselection and decoherence from an information theory perspective*. Annalen der Physik 9, 855.
- [Zurek, 2002] ZUREK, W.H. (2002). *Decoherence and the transition from Quantum To Classical*. Los Alamos Science, 27: 2-25.
- [Zurek, 2003] ZUREK, W.H. (2003). *Decoherence, einselection and the quantum origins of the classical*. Review of Modern Physics, 75, 715-775.

- [Zurek, 2004] ZUREK, W.H. (2004). *Quantum Darwinism and Envariance*. En: BARROW, J.D., DAVIES, P.C.W. y HARPER, (eds.) (2004). *Science Ultimate Reality*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [Zurek, 2007a] ZUREK, W.H. (2007.a). *Relative States and the Environment: Einselection, Envariance, Quantum Darwinism, and the Existential Interpretation*, arXiv:0707.2832v1 [quant-ph].
- [Zurek, 2007b] ZUREK, W.H. (2007.b) *Quantum origin of quantum jumps: Breaking of unitary symmetry induced by information transfer in the transition from quantum to classical* Phys. Rev. A 76, 052110.
- [Zurek, 2008] ZUREK, W.H. (2008). *Relative States and Environment: Einselection, Envariance, Quantum Darwinism and the Existential Interpretation*, Review of Modern Physics vol. 29, 3, 454-462.
- [Zurek, 2009] ZUREK, W.H. (2009). *Quantum Darwinism*, arXiv:0903.5082v1 [quant-ph].
- [Zurek, 2010a] ZUREK, W.H. (2010.a). *Quantum Jumps, Born's Rule, and Objective Reality*. En: SAUNDERS, S. BARRETT, J. ADRIANS, P. WALLACE, D. (2010) *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, Reality*. Oxford: Oxford University Press, 416-432.
- [Zurek, 2010b] ZUREK, W.H. (2010.b). *Quantum Darwinism in no ideal environments..* Phys. Rev. A 81, 062110.
- [Zurek, W.H., 2011] ZUREK, W.H. (2011). En: SCHLOSSHAUER, M. *Elegance and Enigma*. Heidelberg.
- [Zurek, 2013a] ZUREK, W.H. (2013.a). *Probabilities from entanglement, Born's rule from envariance*. Phys. Rev. A 71.
- [Zurek, 2013b] ZUREK, W.H. (2013.b). *Wave-packet collapse and the core quantum postulates: Discreteness of quantum jumps from unitarity, repeatability, and actionable information* Phys. Rev. A 87, 052111.
- [Zurek, 2014] ZUREK, W.H. (2014). *Quantum Darwinism, Classical reality and the randomness of quantum jumps*, Physics Today, 44-50.
- [Zurek, 2018] ZUREK, W.H. (2018). *Quantum theory of the classical: quantum jumps, Born's Rule and objective classical reality via quantum Darwinism*, Philosophical Transaction Royal Society A 376;20180107.